



EGE ÜNİVERSİTESİ

DOKTORA TEZİ

**DİNAMİK SAHNELER İÇİN GERÇEK ZAMANLI
GLOBAL IŞIKLANDIRMA ALGORİTMALARINA
İLİŞKİN YENİ YAKLAŞIMLAR**

Serkan ERGUN

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Aydın ÖZTÜRK

Uluslararası Bilgisayar Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 619.02.04

Sunuş Tarihi: 12.06.2015

E. Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**DİNAMİK SAHNELER İÇİN GERÇEK ZAMANLI
GLOBAL IŞIKLANDIRMA ALGORİTMALARINA
İLİŞKİN YENİ YAKLAŞIMLAR**

Serkan ERGUN

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Aydın ÖZTÜRK

Uluslararası Bilgisayar Anabilim Dalı

**Bilim Dalı Kodu: 619.02.04
Sunuş Tarihi : 12.06.2015**

**Bornova-İZMİR
2015**

Serkan ERGUN tarafından Doktora tezi olarak sunulan “Dinamik Sahneler için Gerçek Zamanlı Global Işıklandırma Algoritmalarına İlişkin Yeni Yaklaşımlar” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 12.06.2015 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri :

İmza

Jüri Başkanı	: Prof.Dr. Aydın ÖZTÜRK
Raportör Üye	: Yrd.Doç.Dr. Cengiz GÜNGÖR
Üye	: Doç.Dr. Adil ALPKOÇAK
Üye	: Prof.Dr. Aylin KANTARCI
Üye	: Yrd.Doç.Dr. Erdal ÖZBEK

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Dinamik Sahneler için Gerçek Zamanlı Global Işıklandırma Algoritmalarına İlişkin Yeni Yaklaşımlar” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

12.06.2015

Serkan ERGUN

ÖZET**DİNAMİK SAHNELER İÇİN GERÇEK ZAMANLI GLOBAL
IŞIKLANDIRMA ALGORİTMALARINA İLİŞKİN YENİ
YAKLAŞIMLAR**

ERGUN, Serkan

Doktora Tezi, Uluslararası Bilgisayar Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Aydın ÖZTÜRK

Haziran 2015, 84 sayfa

Bu tez çalışmasında dinamik sahneler için gerçek zamanlı global ışıklandırma algoritmalarına ilişkin yeni yaklaşımlar öne sürülmüştür. Literatürde öne sürülen konu ile ilgili çalışmalar incelenmiş ve birbirlerini tamamlayan üç yeni yöntem geliştirilmiştir.

Öne sürülen ilk yöntem, çevresel ışıkların önemine göre örneklenmesi üzerinedir. Küresel koordinatlarda iki boyutlu olarak ifade edilen çevresel ışık görüntüsü, Kd-ağacı yapısı kullanılarak bloklara bölünmektedir. Bu blokların önemine göre örneklenmesi, olasılıklarının basit bir model ile ifade edilmesi ile sağlanmıştır.

Geliştirilen ikinci yöntem sahnedeki görünürlük testlerinin gerçek zamanlı olarak yapılabilmesini hedeflemiştir. Bu amaçla sahnedeki nesnelere dışbükey parçalara bölünüp, uzaysal bir veri yapısında saklanmaktadır. Bu veri yapısı gezilerek test edilmesi gereken dışbükey parçalar tespit edilmektedir. Her parça, öne sürülen gerçek zamanlı dışbükey - ışın kesişim testi ile test edilebilmektedir.

Öne sürülen son yöntem gerçek zamanlı olarak görüntü oluşturma denklemini hesaplamayı hedeflemiştir. Bu amaçla çift yönlü yansıma dağılım denklemi, küresel normal dağılım karışımları ile modellenmiştir ve görüntü oluşturma denklemi basitleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Global ışıklandırma, Dinamik Sahneler, Gerçek Zamanlı Görüntü Oluşturma

ABSTRACT**NEW APPROACHES TO REAL-TIME GLOBAL ILLUMINATION
ALGORITHMS FOR DYNAMIC SCENES**

ERGUN, Serkan

PhD in International Computer Department

Supervisor: Prof.Dr. Aydın ÖZTÜRK

June 2015, 84 pages

In this thesis new approaches to real-time global illumination algorithms for dynamic scenes are proposed. Methods on this topic proposed in the literature are investigated and three new methods that complement each other are proposed.

The first proposed method is based on importance sampling of environment maps. Environment map images, parametrized in spherical coordinates as a two-dimensional piecewise function is divided into blocks using a kd-tree structure. By representing the probabilities of these block with a simple model, importance sampling of environment maps can be achieved.

The second method aims to handle visibility tests in real time. For this purpose, objects in the scene are decomposed into convex parts which are then stored in a spatial data structure. Convex parts that needs to be tested can be determined by traversing this data structure. Finally, each convex part can be tested with the proposed real-time convex - ray intersection test.

The last method aims to approximate rendering equation in real time. For this purpose, Bidirectional reflectance distribution function (*BRDF*) is modeled by a mixture of spherical normal distributions which simplifies the rendering equation.

Keywords: Global illumination, Dynamic Scenes, Real-time Rendering.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince danışmanlığımı yapmış olan, deneyimleri ve önerileriyle bana destek olan sayın Prof.Dr. Aydın ÖZTÜRK'e;

Tez izleme toplantılarında jüri olarak görev alan, değerli önerileri ile katkıda bulunan sayın Doç.Dr. Adil ALPKOÇAK'a ve sayın Yrd.Doç.Dr. Cengiz GÜNGÖR'e;

Oda arkadaşlarım Dr. Ahmet BİLGİLİ, Dr. Murat KURT ve Özkan Anıl TÖRAL ile Ege Üniversitesi Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü'nde görevli diğer araştırma görevlisi arkadaşlarım ve değerli hocalarıma;

Uzun tez çalışması süresince her zaman yanımda bulunan ve manevi desteği eksik etmeyen aileme;

“Yurtiçi Doktora Başarı Bursu Programı” ile doktora çalışmamı destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na (BİDEB);

Teşekkürlerimi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xviii
KISALTMALAR DİZİNİ	xxii
1. GİRİŞ	1
1.1 Görüntü Oluşturmadaki Karmaşıklıklar	1
1.2 Çevresel Işıklandırmanın Zorlukları	3
2. RADYOMETRİ VE BRDF	5
2.1 Radyometri ve Fotometri	5
2.2 Katı Açısı, Radyans ve İrradyans	6
2.3 BRDF	7
2.3.1 BRDF'in özellikleri	8
2.3.2 İzotropik ve Anizotropik BRDF	9
2.4 Yaygın Olarak Kullanılan BRDF Modelleri	10
2.4.1 Analitik BRDF modelleri	10
2.4.2 Veriye dayalı BRDF modeli	11

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3. GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA	13
3.1 Görüntü Oluşturma Denklemine Katı Açılı Formu	13
3.2 Görüntü Oluşturma Denklemine Alan Formu	13
3.3 Neumann Serisi	14
3.4 Çevresel Işık Kaynakları	15
3.5 Noktasal Işık Kaynakları	16
3.6 Çevresel Işık Altında Doğrudan Yansımalar	16
3.7 Noktasal Işık Altında İkinci Yansımalar	17
3.8 Monte Carlo Tümeçtirme	18
3.9 Monte Carlo Tümeçtirmesinde Etkinlik	18
3.10 Önemine Göre Örnekleme	19
3.10.1 Kümülatif olasılık dağılım fonksiyonlarına dayalı örnekleme	19
3.10.2 Çoklu önemine göre örnekleme	20
4. IŞIK TAŞIMA (<i>LIGHT TRANSPORT</i>)	21
4.1 Işımsallık (<i>Radiosity</i>)	21
4.2 Işın Yolu İzleme	23
4.3 Çift Yönlü Işın Yolu İzleme	23

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.4 Foton Haritalama	25
5. LİTERATÜR ÖZETİ	26
5.1 Önceden Hesaplanmış Radyans Transferi	26
5.2 Sanal Noktasal Işık Kaynakları	27
5.2.1 Anında Işınsallık	27
5.2.2 Artımsal Anında Işınsallık	27
5.2.3 Kusurlu Gölge Dokuları	28
5.3 Sanal Alansal Işık Kaynakları	28
5.4 Ekran Uzayı Yöntemleri	28
5.4.1 Ekran Uzayı Çevresel Perdeleme	28
5.4.2 Yansıtıcı Gölge Dokuları	29
5.5 Sonlu Elemanlar Yöntemleri	29
6. KD-AĞACI KULLANARAK ÇEVRESEL IŞIĞIN ÖRNEKLENMESİ .	31
6.1 Yöntem	31
6.2 Kd-Ağacı Oluşturma	32
6.2.1 Bölünecek bloğun seçilmesi	32
6.2.2 Ayırma düzlemi seçimi	33

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.2.3 Çoklu önemine göre örnekleme desteği	34
6.3 Örnek Türetme	36
7. GÖRÜNÜRLÜK TESTLERİ	39
7.1 Dışbükey Kesişim Testi	39
7.1.1 Dışbükey ayrıştırma yöntemleri	41
7.1.2 Literatürdeki dışbükey ayrıştırma algoritmaları	42
7.1.3 Hiyerarşik yaklaşık dışbükey ayrıştırma algoritması (HACD)	43
7.1.4 HACD parametreleri	43
7.1.5 Sıradışı durumlar	44
7.1.6 İyileştirmeler	44
7.2 Işın İzleme Algoritması	46
7.2.1 CUDA uygulaması	47
7.2.2 OptiX Uygulaması	48
8. BRDF'İN KÜRESEL NORMAL DAĞILIMLARLA MODELLENMESİ	49
8.1 Literatür Özeti	49
8.2 Küresel Normal Dağılımlar, Spherical Gaussians (SG)	51
8.3 Küresel Normal Dağılımı Karışımları ve Parametre Tahmini	52

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
8.4 BRDF'in GMM ile Modellenmesi	53
8.5 GMM'nin Gerçek-Zamanlı Işıklandırmada Kullanılması	53
8.6 Çekirdek Kestirimi Yöntemi ile Alternatif Çözüm	55
9. SONUÇLAR	58
9.1 Kd-Ağacı Önemine Göre Örnekleme Yöntemi Sonuçları	58
9.2 Dışbükey Görünürlük Testi Yöntemi	59
9.2.1 Dışbükey ayrıştırma sonuçları	59
9.2.2 Görünürlük testi sonuçları	60
9.2.3 Yöntemin parametrelerinin kalite ve hıza etkileri	60
9.2.4 Karşılaştırmalar	62
9.2.5 Kalite	63
9.2.6 Hız	64
9.3 Küresel Normal Dağılımlarına Dayalı BRDF Modelinin Sonuçları	66
10. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	72
KAYNAKLAR DİZİNİ	75
ÖZGEÇMİŞ	83
EKLER	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Işığın saydam malzeme içerisinde hareketi sırasında kırılarak odaklanması.	3
2.1 Görünür ışığın elektromanyetik tayftaki yeri.	5
2.2 a) 2 boyutlu bir açı b) 3 boyutlu bir katı açı.	7
2.3 Radyans gösterimi.	7
2.4 Standart koordinat sistemi.	8
2.5 İzotropik (a) ve anizotropik (b) malzemeler.	10
3.1 Yüzey alanı ile katı açılar arasındaki ilişki.	13
3.2 Görüntü oluşturma denkleminin alansal formu.	14
3.3 Çevresel ışıklandırma ve parametrisasyonu.	15
3.4 Noktasal ışık kaynağının oluşturduğu ikinci yansımalar.	17
6.1 Grace çevresel ışık şiddeti ve farklı kriterlere göre bölünüp tekrar oluşturulmuş ışık şiddeti fonksiyonları.	34
6.2 Farklı kriterler (sırasıyla referans, değişim aralığı, varyans, hata kareler) kullanılarak sıkıştırılmış çevresel ışık altında oluşturulmuş küreler. ...	34
6.3 Blokların hesaplanmış olasılık değerleri ve fit edilmiş olasılık dağılım fonksiyonu.	37
7.1 Kesişim testi sırasında karşılaşılabilecek durumlar.	40
7.2 Soldaki geometri için hesaplanan dışbükey kabuk sağda görülmektedir.	42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.3 Tam bir dışbükey ayrıştırma örneği.	42
7.4 (a) ACD ve (b) HACD yöntemi kullanılarak oluşturulan dışbükey ayrışımı.	43
7.5 Kesişim testi sırasında karşılaşılan hatalı durum.	45
7.6 İkili parabolit parametrizasyon için kullanılan yansıma vektörleri. ...	45
7.7 Kameradan görünen bilgiler: Soldaki iki görüntü quaternion olarak saklanmış tanjant uzayı dönüşümünü göstermektedir. Sağdaki iki görüntü de her noktanın konumunu ve malzeme bilgilerini kodlamaktadır.	47
8.1 Küresel normal dağılım ve parametreleri	54
9.1 Referans görüntüsü, Kd-ağacı ve CDF'e dayalı örnekleme yöntemi ile oluşturulmuş görüntüler.	58
9.2 Kümülatif olasılık dağılım fonksiyonlarına dayalı önemine göre örnekleme ve Kd-ağacı önemine göre örnekleme yöntemlerinin çalışma zamanları.	59
9.3 Üstte Uffizi çevresel ışık şiddeti ve altta bu görüntünün Kd-ağacı yöntemi ile 1:170 oranında sıkıştırılıp yeniden oluşturulmuş hali görülmektedir.	59
9.4 HACD yönteminde kullanılan parametreler.	60
9.5 Princeton Shape Benchmark veritabanından seçilmiş geometrilerin HACD algoritması ile oluşturulmuş dışbükey ayrıştırmaları ve toplam küme sayıları.	61
9.6 Princeton Shape Benchmark veritabanındaki <i>bunny</i> geometrisi için hazırlanıp paketlenmiş küresel düzlem haritası.	62

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
9.7 Farklı malzemeler için oluşturulan görüntüler.	63
9.8 Armadillo geometrisi için içbükeylik derecesine göre (a) oluşturulan dışbükey nesne sayısının (b) görüntü tazeleme oranının (c) referans görüntüyle olan PSNR değerlerinin değişimi.	63
9.9 12 farklı geometri için aynı malzeme ve ışıklandırma altında Referans yöntem RBVH ve Convex yöntemi ile görüntüler oluşturulup PSNR değerleri karşılaştırılmıştır.	65
9.10 Aynı sahne için Solda: RBVH yönteminin her pikselde doku erişim sayısı, Sağda: Önerilen dışbükey kesişim testinin doku erişim sayısı görülmektedir.	66
9.11 Farklı geometriler için referans, RBVH ve Convex yöntemlerinin görüntü tazeleme oranları.	66
9.12 Grace-new çevresel ışığı altında farklı metodlar kullanılarak farklı parlaklık seviyelerinde ışıklandırılmış küreler. Soldan sağa: referans görüntü, filtered importance sampling, all-frequency rendering, gaussian karışım modeli ve kernel density tahmini. Yukarıdan aşağıya: sırasıyla ($\alpha = 0.01; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$) parlaklık seviyeleri. Ekli küçük resimlerde ilgili yöntem ile oluşturulmuş görüntüler ile referans görüntü arasındaki farklar görülmektedir. Görüntülerin altında ise PSNR değerleri verilmiştir.	68
9.13 Uffizi çevresel ışığı altında farklı metodlar kullanılarak farklı parlaklık seviyelerinde ışıklandırılmış küreler. Soldan sağa: referans görüntü, filtered importance sampling, all-frequency rendering, gaussian karışım modeli ve kernel density tahmini. Yukarıdan aşağıya: sırasıyla ($\alpha = 0.01; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$) parlaklık seviyeleri. Ekli küçük resimlerde ilgili yöntem ile oluşturulmuş görüntüler ile referans görüntü arasındaki farklar görülmektedir. Görüntülerin altında ise PSNR değerleri verilmiştir.	69

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

- 9.14 Pisa çevresel ışığı altında farklı metodlar kullanılarak farklı parlaklık seviyelerinde ışıklandırılmış küreler. Soldan sağa: referans görüntü, filtered importance sampling, all-frequency rendering, gaussian karışım modeli ve kernel density tahmini. Yukarıdan aşağıya: sırasıyla ($\alpha = 0.01; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$) parlaklık seviyeleri. Ekli küçük resimlerde ilgili yöntem ile oluşturulmuş görüntüler ile referans görüntü arasındaki farklar görülmektedir. Görüntülerin altında ise PSNR değerleri verilmiştir. 70
- 9.15 Doge2 çevresel ışığı altında farklı metodlar kullanılarak farklı parlaklık seviyelerinde ışıklandırılmış küreler. Soldan sağa: referans görüntü, filtered importance sampling, all-frequency rendering, gaussian karışım modeli ve kernel density tahmini. Yukarıdan aşağıya: sırasıyla ($\alpha = 0.01; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$) parlaklık seviyeleri. Ekli küçük resimlerde ilgili yöntem ile oluşturulmuş görüntüler ile referans görüntü arasındaki farklar görülmektedir. Görüntülerin altında ise PSNR değerleri verilmiştir. 71

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ACD	Yaklaşık Dışbükey Ayrıştırma (Approximate Convex Decomposition)
BRDF	Çift Yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu (Bidirectional Reflectance Distribution Function)
BSSRDF	Çift Yönlü Yüzey-Altı Saçılım Fonksiyonu (Bidirectional Sub-Surface Scattering Function)
BVH	Kapsayan Hacim Hiyerarşisi (Bounding Volume Hierarchy)
CDF	Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (Cumulative Distribution Function)
CPU	Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit)
CUDA	Hesaplama Bütünleşik Cihaz Mimarisi (Compute Unified Device Architecture)
EM	Beklenen Değer Maksimizasyonu (Expectation-Maximization)
FACD	Hızlı Yaklaşık Dışbükey Ayrıştırma (Fast Approximate Convex Decomposition)
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemleri (Finite Elements Methods)
GMM	Gauss Karışım Modeli (Gaussian Mixture Model)
GPU	Grafik İşlem Birimi (Graphics Processing Unit)
HACD	Hiyerarşik Yaklaşık Dışbükey Ayrıştırma (Hierarchical Approximate Convex Decomposition)
HDR	Yüksek Dinamik Aralık (High Dynamic Range)
IIR	Artımsal Anında Işınsallık (Incremental Instant Radiosity)
IR	Anında Işınsallık (Instant Radiosity)
ISM	Kusurlu Gölge Dokuları (Imperfect Shadow Maps)

KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
KDE	Çekirdek Yoğunluk Kestirimi (Kernel Density Estimation)
MIS	Çoklu Öneme Göre Örnekleme (Multiple Importance Sampling)
PRT	Önceden Hesaplanmış Parlaklık Transferi (Precomputed Radiance Transfer)
PSNR	Tepe Sinyal Gürültü Oranı (Peak Signal-To-Noise Ratio)
RBVH	Rasterize Edilmiş Kapsayan Hacim Hiyerarşisi (Rasterized Bounding Volume Hierarchy)
RSM	Yansıtıcı Gölge Dokuları (Reflective Shadow Maps)
SG	Küresel Normal Dağılım (Spherical Gaussian)
SH	Küresel Harmonikler (Spherical Harmonics)
SSAO	Ekran Uzayı Çevresel Perdeleme (Screen Space Ambient Occlusion)
SSS	Yüzey Altı Saçılma (Sub-Surface Scattering)
VAL	Sanal Alansal Işık Kaynakları (Virtual Area Lights)
VPL	Sanal Noktasal Işık Kaynakları (Virtual Point Lights)

1. GİRİŞ

Uzun yıllardır animasyon filmleri, reklam sektörü, bilgisayar oyunları, mimari uygulamalar ve tasarım programları gibi bir çok alanda sentetik görüntülerin oluşturulmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu alanda birçok araştırma yapılmış ve halen yapılmaya devam etmektedir. Literatürde öne sürülen yöntemler bu kapsamlı konunun sadece küçük bir alt problemini farklı hedeflerle çözerler. Örneğin, animasyon filmlerinde kalite ön planda iken, bilgisayar oyunlarında performans daha ön plandadır. Bu tez kapsamında ise görüntü oluşturma sırasında kullanılacak, performansa daha çok önem veren, kabul edilebilir kalitede görüntüler üreten yeni algoritmalar öne sürülmüştür.

1.1 Görüntü Oluşturmadaki Karmaşıklıklar

Fotoğraf kalitesine yakın sentetik görüntüler oluşturmak son derece zorlu bir problemdir. Bu görüntülerde animasyonun ya da kullanıcı etkileşiminin sağlanması çok daha karmaşıktır (Dachsbacher and Kautz, 2009). Oluşturulan sentetik görüntülerin görsel karmaşıklığına birlikte etki eden birçok karmaşıklık türü vardır. Bu karmaşıklık türleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Geometrik karmaşıklık: Sahneler çok fazla ayrıntıyı içerir. Gerçekçi sentetik görüntülerin yaratılabilmesi için sahnelerin yeterince ayrıntılı modellerinin oluşturulması gerekir.

Malzeme karmaşıklığı: Fiziksel doğruluğa sahip sentetik bir görüntü oluşturabilmek için, ışığın yüzeye olan etkileşiminin etkin bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Işık herhangi bir yüzeye ulaştığında bir kısmı kırılarak yüzeyin içine girer, bir kısmı da doğrudan yansır. Opak malzemeler için literatürde ışığın hangi yöne ne kadar yansıdığını tanımlayan çift yönlü yansıma dağılım fonksiyonu (*Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF*) ismi verilen modeller kullanılır. Yarı saydam malzemeler için ise ışığın nesne içerisine girdiği ve nesneden çıktığı noktaları da dikkate alan çift yönlü yüzey-altı saçılım fonksiyonu (*Bidirectional Sub-Surface Scattering Function - BSSRDF*) ismi verilen modeller kullanılır.

Işıklandırma karmaşıklığı: Sahneye etki eden ortam ışıkları, sentetik görüntülerin gerçekliğinde en önemli etkenlerden biridir. Grafik uygulamalarında aşağıda listelenen ışık türleri kullanılmaktadır.

- Ortam ışığı, hesaplama maliyeti en düşük olan ışık türüdür. Sahnede her yerde

her yönden aynı şiddette gelen ışık olarak tanımlanır.

- Yönlü ya da noktasal ışık kaynakları fiziksel olarak mümkün olmasalar da hesaplama maliyeti düşük yaklaşımlardır. Yönlü ışık kaynakları sonsuzdan gelen ışık olarak kabul edilir ve noktasal ışık kaynakları sonsuz küçüklükte bir noktadan yayılan ışık olarak tanımlanır.
- Spot ışık kaynakları yapı olarak noktasal ışık kaynaklarına benzemektedir. Tek noktadan sadece belirli bir yön aralığında yayılan ışık türüdür. Hesaplama maliyeti noktasal ışık kaynaklarının hesaplama maliyetine eşdeğerdir.
- Alansal ışıklar, fiziksel olarak daha doğru sonuçlar üretir fakat hesaplama maliyeti diğerlerine göre oldukça yüksektir.
- Çevresel ışıklar, sonsuzdan her yönde farklı şiddetle geldiği kabul edilen ışıklardır. Fiziksel doğruluğu olmasa da görsel olarak kabul edilebilir görüntüler oluşturmaktadır. Hesaplama maliyeti olarak alansal ışıklara eşdeğerdir.

Transfer karmaşıklığı: Işık sahnede hareket ederken birçok nesne ile farklı şekilde etkileşime girer. Kimi malzemeler ışığın bir kısmını soğururken, bir kısmını da yansıtır. Yarısaydam malzemeler ise bunlara ek olarak ışığın kırılarak malzeme içerisinde hareketine izin verir. Işığın sahnedeki hareketinin oluşturduğu karmaşıklık türleri aşağıda listelenmiştir.

- Gölgeler saydam olmayan bir cisim tarafından ışığın engellenmesiyle oluşur. Bir noktanın gölgede olup olmadığının anlaşılabilmesi için o nokta ile ışık kaynağı arasında herhangi bir opak nesnenin olup olmadığı kontrol edilmelidir. Grafik uygulamalarında ışık kaynağından görülen yüzeyler bulunup ışıklandırılır. Işıklıdırılmayan yüzeyler gölgede kalır. Işığın ikinci ve sonraki yansımalarındaki görünürlük testlerinin gerçekleştirilmesi, tek bir noktasal ışık kaynağından görülen yüzeylerin bulunmasından daha karmaşık bir problemdir.
- Kırılmalar (*caustics*). Işık ayna gibi çok parlak yüzeylerden yansıyarak, ya da yarısaydam malzemelerin içerisinde geçerken kırılarak belirli bir alanda odaklanır. Odaklandığı yüzeyde oluşan ışık desenlerine kırılmalar denir. (Şekil 1.1)
- Yüzey Altı Saçılma (*Sub-Surface Scattering - SSS*). Yarı saydam malzemelerde, ışığın bir kısmı yüzeyden yansırken geri kalanı yüzeyin içinde hareketine devam eder. Bu hareketi sırasında bir kısmı parçacıklar nedeniyle dağılırken, bir kısmı emilir.



Şekil 1.1. Işığın saydam malzeme içerisinde hareketi sırasında kırılarak odaklanması (Zhou et al., 2008).

- Karşılıklı yansımalar (*inter-reflections*). Işık, ayna gibi çok parlak yüzeylerden yansiyarak yansıma görüntüleri oluşturur. Böyle yüzeylerden oluşan bir sahnede, ışık yüzeyler arasında birçok kere yansiyarak birçok yansıma görüntüsü oluşturur. Bu türdeki karşılıklı yansımaların hesaplama maliyeti yüksektir.

1.2 Çevresel Işıklandırmanın Zorlukları

- Nesnelere karmaşık ve uzaysal değişiklik gösteren malzeme özellikleri içerir. Bu nedenle genel yansıma modelleri ve uzaysal farklılık sağlanmalıdır.
- Genel ışıklandırma ortamları, basit noktasal ışıklandırmalardan zorlayıcıdır.
- Geleneksel yöntemlerle alansal ışık kaynaklarının tümleştirilmesi maliyetlidir.
- Alansal ışık kaynaklarının yumuşak gölgeleri, karşılıklı yansımalar, kırılmalar ve yüzey altı saçılmalar gibi karmaşık ışık transferlerinin desteklenmesi gerekir.

Gerçek zamanlı global ışıklandırma yöntemlerinin zorlayıcı problemlerinden biri de dinamik dolaylı görünürlük testidir. Dinamik bir sahnedeki herhangi bir noktanın herhangi bir noktadan görünüp görünmediğinin test edilmesi gerekir.

Bahsi geçen bu zorlukları aşmak için farklı çalışmalarda fiziksel doğruluk göstermeyen bir takım varsayımlar kabul edilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda listelenmiştir.

- Dolaylı ışıklandırmalar düşük frekanslı oldukları için, görünürlük testleri dikkate alınmayabilir. Sahnedeki her noktanın her noktayı gördüğü kabul edilir.

Böylelikle, maliyetli görünürlük testlerinden kaçınılır.

- Görünürlük testlerinin hızlı bir şekilde yapılabileceği hiyerarşik ağaç yapıları mevcuttur. Fakat bu yapıların oluşturulması gerçek zamanlı kullanım için uygun değildir. Bu nedenle, bu hiyerarşik ağaçlar, statik sahneler için sadece bir kere oluşturulup değiştirilmeden gerçek zamanlı olarak kullanılabilir. Dinamik sahnelerde, sahne değiştiği için, bu hiyerarşik yapıların güncellenmesi gerekmektedir.
- Işık, yüzeylerden yansırken, enerjisinin bir kısmı malzeme tarafından soğurulur. Bu nedenle ışık yüzeylerden yansıkça enerji kaybeder. Kameraya ulaşan ışığın hesaplanmasında her yansıma çok maliyetlidir. Bu nedenle birçok uygulamada ilk iki yansımanın yeterli olduğu öne sürülmüştür.
- Kimi yüzeyler bir ayna gibi ışığı yansıtırken, diğer yüzeyler her yöne eşit olarak dağıtırlar. Işığın ikinci ve daha sonrası yansımalarında enerjisi azaldığı için ikinci yansımalarda genellikle düşük frekanslı görüntüler oluşmaktadır. Bu yüzden bazı yöntemler, hesaplama maliyetini düşürme amacıyla ikinci yansımalarındaki malzemelerin mat malzemeler olduğu kabul etmiştir.

Sahnelerin sentetik görüntüleri oluşturulurken bir önceki bölümde belirtilen karmaşıklık türlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu tezde çevresel ışıklandırma altındaki dinamik sahnelerde karşılıklı yansımaların fiziksel özellikleri yansıtacak biçimde ve gerçek zamanlı olarak hesaplanması hedeflenmiştir. Bu amaca yönelik üç ayrı algoritma geliştirilmiştir. Öne sürülen algoritmalarından ilki, çevresel ışıkların gerçek zamanlı olarak önemine göre örneklenmesi üzerine bir çözüm getirmekte, ikinci algoritma dinamik sahnelerde gerçek zamanlı görünürlük testlerini gerçekleştirmekte, üçüncü algoritma ise, her malzeme çeşidi için gerçek zamanlı olarak kullanılabilir tümleştirme yapmaktadır.

Tezin ikinci bölümünde radyometri ve BRDF, üçüncü bölümünde görüntü oluşturma denklemi, dördüncü bölümünde de ışık taşıma yöntemleri hakkında özet bilgi verilecektir. Beşinci bölümünde literatür özeti verilmiştir. Altıncı bölümde kd-ağacı kullanılarak çevresel ışığın örneklenmesi, yedinci bölümde görünürlük testleri ve sekizinci bölümde BRDF'in küresel normal dağılımlarla modellenmesi hakkında yapılan öneriler ayrıntılarıyla açıklanacaktır. Dokuzuncu bölümde sonuçlar verilmiş ve onuncu bölümde de önerilere yer verilmiştir.

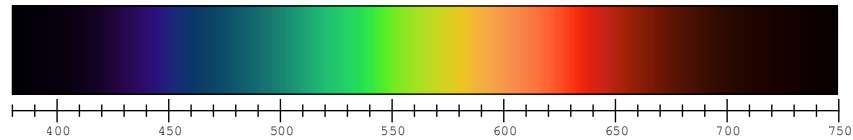
2. RADYOMETRİ VE BRDF

Bu bölümde, bir yüzeyden yansıyarak insan gözüne ulaşan ışığın ölçülmesi için kullanılan temel bilimsel ölçüler verilmiştir. İlk kısımda radyometri ve fotometri adı verilen, ışığın sayısal olarak ifade edilebilmesine imkan veren ölçümleme esasları açıklanırken, ikinci kısımda katı açı, radyans ve irradyansın tanımları verilmiştir. Üçüncü kısımda BRDF'in tanımı verilirken dördüncü kısımda da yaygın olarak kullanılan BRDF modelleri açıklanmıştır.

2.1 Radyometri ve Fotometri

Işık, ya da elektromanyetik radyasyon spektrumunun görünür kısmı, çevresel bilginin önemli bir kısmının algılanmasını sağlayan bir ortamdır. Fotometri, bu görünür ışık enerjisinin ölçümü ile ilgilenir. Bunu yanı sıra optik radyant enerji, sadece insan gözünün algıladığı görünür ışığı değil, gözle görülemeyecek radyasyonu da kapsar. Radyometri ise ışığın görünen kısmı dahil olmak üzere tüm optik radyasyon aralığında radyant enerjinin ölçümü ile ilgilenir.

Optik radyasyonun frekansı 3×10^{11} ile 3×10^{16} Hertz arasında değişmektedir. Bu aralık, 100 nanometre ile 1 milimetre dalga boyu aralığına denk gelmektedir (Akenine-Möller et al., 2008). Dalga boyu 400 nanometre ile 800 nanometre arasında kalan optik radyasyon insan gözü tarafından algılanabilmektedir, bu yüzden görülebilir ışık olarak adlandırılır. Mavi (450 nm), yeşil (540 nm), kırmızı (650 nm) ve diğer renklerdeki ışıkların dalga boyları bu aralığa düşmektedir (Akenine-Möller et al., 2008). 400 nanometreden daha küçük dalga boyuna sahip optik radyasyon mor-ötesi radyasyon olarak; 800 nanometreden daha büyük dalga boyuna sahip radyasyon da kızıl ötesi radyasyon olarak adlandırılır. Görülebilir ışığın dalga boyu aralığı ve algılanan renkler Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Görünür ışığın elektromanyetik tayftaki yeri.

Işığın ulaşabileceği en yüksek hız $c = 2.998 \times 10^8 m/s$ 'dir. Bu hıza, vakum ortamında ulaşır. Su, hava gibi diğer ortamlara girdiğinde ışığın hızı azalır. Işığın frekansı, ν , her zaman sabit kaldığından, hızı değiştiğinde dalga boyu, λ , değişmek zorundadır. Işığın frekansı, ν , ve dalga boyu, λ , arasındaki ilişki Eşitlik 2.1'de ve-

rilmiştir.

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Fotonların sahip olduğu enerji, radyant enerji, Joule J cinsinden ölçülür ve Q ile gösterilir. Radyant enerji, ışığın frekansı ile doğrudan ilişkilidir ve bu ilişki Eşitlik 2.2’de verilmiştir. Eşitlikteki $h = 6.62620 \times 10^{-34} Js$, Planck sabiti olarak adlandırılmaktadır.

$$Q = hv \quad (2.2)$$

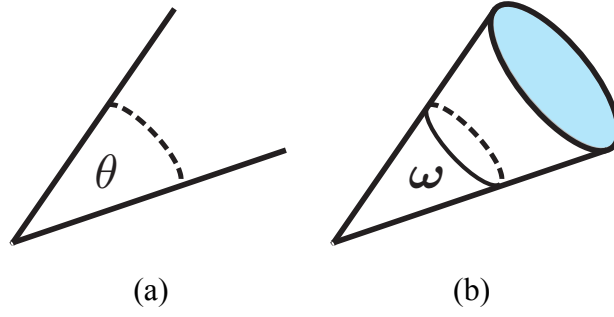
Radyant akısı ya da radyant gücü, bir yüzeyden ya da uzay alanından saniyede geçen radyant enerji miktarıdır (dQ/dt). J/s ya da *watt* cinsinden ölçülür ve Φ ile gösterilir. Radyant akısı aynı zamanda bir ışık kaynağının birim zamanda ürettiği radyant enerjinin miktarıdır.

2.2 Katı Açı, Radyans ve İrradyans

Radyant akı yoğunluğu, birim alana (dA) düşen radyant akısıdır ($d\Phi/dA$). W/m^2 cinsinden ölçülür ve ışığın hareket yönüne göre farklı isimler alır. Eğer ışık yüzeye doğru geliyorsa, irradyans (E); yüzeyden çıkıyorsa ışınsallık (*radiosity*) (M) olarak adlandırılır. Her iki akı yoğunluğunun da birimleri aynıdır.

Çoğu grafik uygulamasında hesaplama maliyetini düşürmek için iğne deliği kamera denilen, pratikte mümkün olmayan, sadece tek bir noktadan ışığın geçmesine izin veren kameralar kullanılır. Ayrıca aynı amaçla yine fiziksel olarak mümkün olmayan, tek bir noktadan her yöne eşit miktarda ışık yayan noktasal ışık kaynakları kullanılır. Bu nedenle, ışıklandırma hesaplamalarında alan cinsinden ölçüler yerine katı açı (*solid angle*) olarak isimlendirilen açısal ölçüler kullanılır. Katı açı (ω), steradyan (*sr*) cinsinden ölçülür. 2 boyutta ölçülen açının (θ , Şekil 2.2a) 3 boyuta (Şekil 2.2b) genişletilmiş halidir. 2 boyuttaki birim çember 2π radyan olarak ölçülürken, 3 boyutta bir küre 4π steradyan olarak ölçülür.

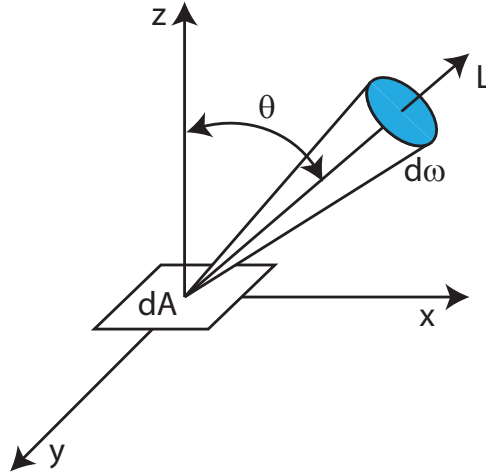
Bilgisayar grafiklerinde oluşturulan görüntülerin her pikselinde saklanan değer radyans değeridir. Radyans, insanlar tarafından algılanan parlaklığın fiziksel ölçüsüdür. İrradyans veya ışınsallıktan farklı olarak yüzeye gelen veya yüzeyden ayrılan değeri gösterebilmektedir. L ile gösterilir ve Eşitlik 2.3’de tanımlanmıştır (Akenine-Möller et al., 2008). Eşitlikte $d\Phi/dA$, birim alana (dA) düşen radyant akısıdır ($d\Phi$), $d\omega$ gelen ışığın katıaçı cinsinden yönü ve θ ise yüzey normali ile gelen ışık arasındaki açıyı göstermektedir.



Şekil 2.2. a) 2 boyutlu bir açı b) 3 boyutlu bir katı açı.

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA d\omega \cos \theta} \quad (2.3)$$

Şekil 2.3’de görüldüğü gibi, birim katı açının gösterdiği yönden ($d\omega$) birim alana (dA) düşen radyant akı miktarına radyans olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.3. Radyans gösterimi.

2.3 BRDF

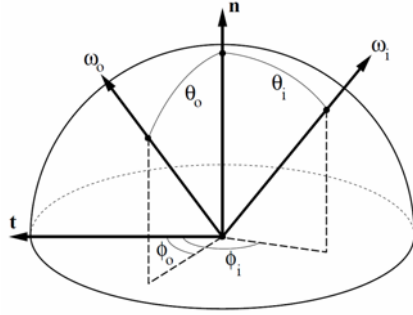
Sentetik görüntü oluşturma sırasında gerçekliğin sağlanabilmesi için, ışığın yüzeyle olan ilişkisi iyi tanımlanmalıdır. Böylece bilgisayar ortamında simülasyonu yapılarak görüntü oluşturulabilir. BRDF ışık ile malzemenin bu ilişkisini tanımlamaktadır.

Nicodemus (1965) tarafından radyansın irradyansa oranı olarak tanımlanan BRDF’in birimi $1/sr^2$ ’dir. Aşağıdaki eşitlikte tanımı verilmiştir.

$$\rho(\omega_i, \omega_o) = \frac{dL_o(\omega_o)}{dE(\omega_i)} = \frac{dL_o(\omega_o)}{L_i(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (2.4)$$

Eşitlikte görüldüğü gibi BRDF $\omega_i = (\theta_i, \phi_i)$ gelen ışık yönünü ve $\omega_o = (\theta_o, \phi_o)$ yansıyan ışık yönünü gösteren birim vektörler olmak üzere, $\rho(\omega_i, \omega_o)$ şeklinde tanımlanmıştır. BRDF ışığın dalgaboyuna göre değişiklik gösterse de literatürdeki modeller bu bağımlılığı gözardı etmişlerdir.

Birim yön vektörleri küresel koordinat sisteminde θ elevasyon (*elevation*) ve ϕ azimut (*azimuth*) açıları ile tanımlanabildikleri için BRDF $\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o)$ olacak şekilde 4 boyutlu olarak tanımlanabilir (Rusinkiewicz, 1998). Şekil 2.4'te gelen ışık yönü ve yansıyan ışık yönü standart koordinat sistemi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Standart koordinat sistemi (Rusinkiewicz, 1998).

Malzemeler gelen ve yansıyan ışık yönleri ve ışığın dalgaboyuna göre renk değiştirebilseler de, hesaplama maliyetini düşürmek amacıyla ışığın renk tonu (*hue*) ya da doygunluğun (*saturation*) değişmediği sadece ışık şiddetinin değiştiği kabul edilmektedir (Akenine-Möller et al., 2008). Bu varsayım hesaplama maliyetlerini düşürüp, BRDF'in parametre sayısını azaltsa da, malzemenin birtakım özelliklerini yoksaymak anlamına gelir.

Görüntüleme cihazları RGB renk modelini kullanmaktadır. Bu modelde ışık rengi kırmızı, yeşil ve mavi renklerin birleşiminden oluşturulmaktadır. BRDF verileri de ölçülürken kırmızı, yeşil ve mavi kanallar ayrı olarak ölçülmektedir. Daha sonra her üç renk kanalı için ölçülen veriler tek BRDF modelinin parametrelerine uydurulur. Görüntü oluşturma işlemi bu parametreler üzerinden gerçekleşir.

2.3.1 BRDF'in özellikleri

Fiziksel gerçekliğin sağlanabilmesi için BRDF modellerinin sağlaması gereken üç önemli özellik bulunmaktadır. Lewis (1994), bu özellikleri çalışmasında daha detaylı olarak açıklamıştır.

İlk özellik BRDF'in tüm yansıyan ve gelen açı kombinasyonlarında pozitif değerler üretmesi gerektiğidir. BRDF yansıyan ışık şiddetinin gelen ışık şiddetine

oranıdır. Işık şiddeti negatif olamaz. Dolayısıyla ışık şiddeti oranlarının, BRDF'in negatif olması mümkün değildir.

İkinci önemli özellik Helmholtz karşılıklık (*reciprocity*) olarak adlandırılır. Bu özelliğe göre gelen ışık yönü ile yansıyan ışık yönü karşılıklı olarak yer değiştirdiğine BRDF'in değerinin değişmemesi gerekir. Bu durum Eşitlik 2.5'de gösterilmiştir.

$$\rho(\omega_i, \omega_o) = \rho(\omega_o, \omega_i) \quad (2.5)$$

BRDF'in son önemli özelliği ise enerjinin korunumudur. Işık yüzeye ulaştığında bir kısmı yansır, bir kısmı is malzeme tarafından soğurulur. Dolayısıyla gelen ışık şiddeti, yansıyan ışık şiddetinden büyük olmalıdır. Bu durumda Eşitlik 2.6'da verilen eşitsizlik sağlanmalıdır.

$$\int_{\Omega^+} \rho(\omega_i, \omega_o) \cos \theta_i d\omega_i \leq 1 \quad (2.6)$$

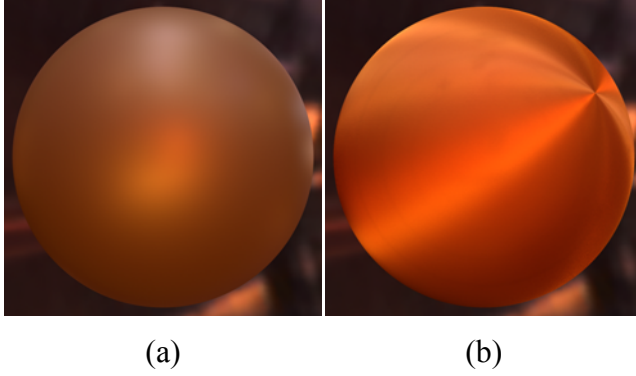
Bu özelliklerin tamamını sağlayan BRDF modellerine fiziksel olarak tatmin edici (*physically plausible*) denmektedir (Edwards et al., 2006). Bu özelliklerin bir kısmını sağlayan BRDF modelleri (Blinn, 1977; Ashikhmin and Shirley, 2000) olsa da birçok model tamamını sağlamamaktadır. Bu tür modeller görsel olarak tatmin edici (*visually plausible*) olarak adlandırılmaktadır (Edwards et al., 2006). Modellerin bir kısmı sadece Helmholtz karşılıklık özelliğini sağlarken (Blinn, 1977; Ward, 1992), bir kısmı da sadece enerjinin korunumunu sağlamaktadır (Edwards et al., 2006).

2.3.2 İzotropik ve Anizotropik BRDF

Malzemeler, üzerlerindeki mikrofasetlerin dağılımına göre izotropik ya da anizotropik malzemeler olmak üzere iki türe ayrılmaktadır (Ngan et al., 2005). Gelen ve yansıyan ışık yönleri sabit tutulurken malzeme yüzey normali etrafında döndürüldüğünde BRDF değerinde herhangi bir değişiklik olmuyorsa bu malzemelere izotropik, yön bağımsız, malzemeler denir. Eğer BRDF değerlerinde değişiklik oluyorsa anizotropik, yön bağımlı olarak adlandırılır (Akenine-Möller et al., 2008). Şekil 2.5'de bu malzeme türleri ile oluşturulmuş görüntüler görülmektedir.

BRDF modellerinin bir kısmı sadece izotropik malzemeleri modelleyebilirken (Phong, 1975; Cook and Torrance, 1981), bazı modeller her iki tür malzemeyi de

modelleyebilmektedir (Ward, 1992; Ashikhmin and Shirley, 2000).



Şekil 2.5. İzotropik (a) ve anizotropik (b) malzemeler.

2.4 Yaygın Olarak Kullanılan BRDF Modelleri

Literatürde BRDF’i modelleyen birçok fonksiyonlar öne sürülmüştür. Bu yöntemlerden bazıları basit analitik fonksiyonlar şeklinde iken bazıları ise yüksek miktarlarda veriye ihtiyaç duyar. Bazı modeller deneysel olarak öne sürülmüşken bazı modeller optik temellerine dayanmaktadır. Bu bölümde analitik BRDF modelleri ve veriye dayalı modellerden en sık kullanılanları hakkında detaylar verilecektir.

2.4.1 Analitik BRDF modelleri

Analitik BRDF modelleri, BRDF fonksiyonlarını birkaç parametreye sahip analitik fonksiyonlar ile modelleyebilmektedir. Grafik uygulamalarında sıklıkla kullanılan Analitik BRDF modellerinden bazıları, Phong, Blinn-Phong, Lafortune, Cook-Torrance ve Ward BRDF modelidir.

Lambert BRDF modeli bilinen en basit BRDF modellerinden biridir. Bu modelde gelen ışık her yöne eşit miktarda yayılmaktadır, dolayısıyla model yansıyan ışığın yönünden bağımsızdır. Bu yüzden model sadece izotropik mat malzemeler için kullanılabilir.

Oren–Nayar BRDF modeli (Oren and Nayar, 1994) Lambert BRDF modelinin geliştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Pürüzlü, mat yüzeyler için geliştirilmiştir. Model, yüzey mikrofasetler arası gölgelemeler ve yansımalar gibi fiziksel olayları dikkate alır. Günümüzde bilgisayar grafiklerinde pürüzlü yüzeylerin görüntülerinin oluşturulmasında kullanılır.

Phong (Phong, 1975) BRDF modeli, parlak yansımaları modelleyen ampirik

bir modeldir. Phong modeli yansıma vektörü ile bakış vektörü arasındaki açıya bağlıdır. Ayrıca yansıma rengini belirleyen bir renk parametresi ile parlaklık derecesini belirleyen bir parametreye bağlıdır. Blinn donanımında hesaplama kolaylığı sağlamak amacıyla bu modelde yansıma vektörü ile bakış vektörü arasındaki açı yerine, yarıyol vektörü ile normal vektörü arasındaki açının kullanılabileceğini belirtmiştir. Önerdiği bu yeni model Blinn-Phong (Blinn, 1977) modeli olarak adlandırılmaktadır. Phong ve Blinn-Phong modelleri, sadece izotropik malzemeler için tasarlanmış olsalar da Ashikhmin ve Shirley (Ashikhmin and Shirley, 2000) modeli anizotropik malzemeler için uyarlamışlardır.

Lafortune (Lafortune et al., 1997) BRDF modeli Phong BRDF modelinin genelleştirilmiş halidir. Enerjinin korunumu ve Helmholtz karşılıklık kuralına uyar. Phong modelinde bakış vektörü yüzey normaline göre yansıtılırken, Lafortune modelinde modelin parametresi olan bir oryantasyon vektörüne göre yansıtılır. Böylece kedi gözü gibi geri yansıtıcı (*retroreflective*) malzemelerin de ifade edilebilmesi sağlanmıştır.

Torrance-Sparrow modeli (Torrance and Sparrow, 1966) mikrofaset modeline dayanan fiziksel tabanlı bir modeldir. Model, mat yansımalar için Lambert modelini kullanırken, parlak yansımalar için üç farklı bileşenden oluşan bir fonksiyon kullanılmaktadır. Bu bileşenlerden ilki mikrofaste dağılımını belirler. Genellikle Beckmann (Beckmann and Spizzichino, 1963) dağılımı kullanılır fakat Gaussian dağılımı da kullanılabilir. İkinci bileşen Fresnel faktörüdür. Fresnel faktörü, bakış yönüne ve malzemenin kırılma endeksine göre gelen ışığın ne kadarının malzemenin yansıdığını belirler. Son bileşen ise geometrik zayıflama (*attenuation*) faktörü olarak adlandırılır. Mikro düzeydeki pürüzlerin gelen ışığın bir kısmının gölgeler. Geometrik zayıflama faktörü bu gölgelemelerden sonra ışığın ne kadarının yansıdığını belirler. Cook-Torrance (Cook and Torrance, 1982) modelinde ise Torrance-Sparrow modeli, sadece yarıyol vektörü yönündeki mikrofasetleri dikkate alacak şekilde düzenlenmiştir.

Anizotropiyi dikkate alan diğer modellerin hesaplama maliyeti yüksek olduğundan Ward (1992), Gaussian loblar kullanan yeni bir yansıma modeli öne sürdü. Ward BRDF modeli, herhangi fiziksel altyapısı olmadan deneysel olarak ölçülmüş veriye uydurulmuştur. Malzemenin parlaklık derecesi, kullanılan Gaussian loblarının standart sapması ile kontrol edilebilmektedir.

2.4.2 Veriye dayalı BRDF modeli

Analitik yöntemler hesaplama maliyeti ve önemine göre örneklenmesinin kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedir. Fakat, bu yöntemlerin parametre sayısı sınırlı olduğundan serbestlik derecesi sınırlıdır ve her tür malzemeyi yeterli kalitede ifade edemeyebilirler. Bu nedenle ölçülmüş BRDF verisini uygun bir şekilde sıkıştırıp kullanan yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler analitik modellere göre daha esnek olduğundan gerçek hayatta karşılaşılan malzememeleri daha iyi modeller. Fakat önemine göre örneklenmesi analitik modellere göre daha zordur. Veriye dayalı her model kendisine özel geliştirilmiş bir önemine göre örnekleme prosedürü içerir.

Veriye dayalı BRDF modellerinde kullanılan veri genellikle faktörizasyon yöntemleriyle sıkıştırılmaktadır. Literatürde, Lawrence et al. (2004) ve Bilgili et al. (2011) bu tür faktörizasyonlara dayalı BRDF modelleri öne sürmüşlerdir.

Lawrence et al. (2004) modelinde 4 boyutlu BRDF verisini uygun bir diziyle 2 boyutlu matris haline dönüştürülür. Daha sonra bu matris negatif olmayan matris faktörizasyonu yöntemi ile çarpanlarına ayrılarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiş olur. Ayrıca çarpanlarına ayrılmış veri doğrudan kullanılarak önemine göre örnekleme yapılabilir.

Bilgili et al. (2011) modelinde ise BRDF verisi doğrudan Tucker tensor faktörizasyonu ile çarpanlarına ayrılır ve sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiş olur. Hata miktarı hesaplanarak hata üzerine tekrar Tucker faktörizasyonu uygulanır. Bu işlem birkaç defa üstüste uygulanarak hata miktarı azaltılabilir. Bu yöntemde de çarpanlarına ayrılmış veri kullanılarak önemine göre örnekleme gerçekleştirilmiştir.

3. GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA

Görüntü oluşturma denklemi, ışıklandırılmış bir ortamda bulunan bir nesne için, sahnedeki ışık akışının dengesini modeller. Sahnedeki bir noktadan izleyiciye ne kadar ışık geldiğini tanımlamak için kullanılır (Kajiya, 1986). Denklem, katı açı formunda tanımlanabilir ya da sahnedeki diğer yüzey alanları üzerinden gelen ışık hesaplanabilir. Her iki yöntem de bu bölümde açıklanmıştır.

3.1 Görüntü Oluşturma Denkleminin Katı Açı Formu

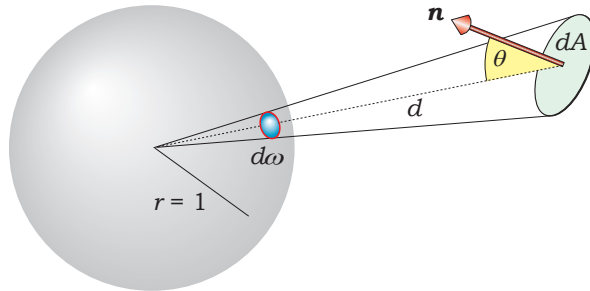
Görüntü oluşturma denkleminin (Kajiya, 1986) katı açı formu, Eşitlik 3.1'de verilmiştir.

$$L_o(\mathbf{p}, \omega_o) = L_e(\mathbf{p}, \omega_o) + \int_{\Omega^+} \rho(\mathbf{p}, \omega_i, \omega_o) L_i(\mathbf{p}, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad (3.1)$$

Görüntü oluşturma denklemi, \mathbf{p} noktasından ω_o yönünde yansıyan toplam ışığın şiddetini (L_o) hesaplamak için kullanılmaktadır. Eşitlikte tümleştirme \mathbf{p} noktasındaki yarıküre üzerinde katı açılar cinsinden yapılmaktadır. $\rho(\mathbf{p}, \omega_i, \omega_o)$ fonksiyonu, çift-yönlü yansıma dağılım fonksiyonları olarak bilinen (Nicodemus, 1965) ve ω_i yönünden \mathbf{p} noktasına gelen ışığın ne kadarının ω_o yönünde yansıdığını gösteren bir fonksiyondur. L_e fonksiyonu \mathbf{p} noktasından ω_o yönünde yayılan ışığı, ve L_i , \mathbf{p} noktasına ω_i yönünden gelen ışığı tanımlar.

3.2 Görüntü Oluşturma Denkleminin Alansal Formu

Görüntü oluşturma denkleminin alansal formunda katı açılar yerine yüzey elemanları kullanılmaktadır. Şekil 3.1'de normal; birim çemberin merkezinden geçen doğru ile θ açısı yapacak şekilde d uzaklığa yerleştirilmiş bir yüzey elemanı görünmektedir. Bu yüzeyin diferansiyel katı açısı Eşitlik 3.2'deki gibidir.



Şekil 3.1. Yüzey alanı ile katı açılar arasındaki ilişki (Suffern, 2007).

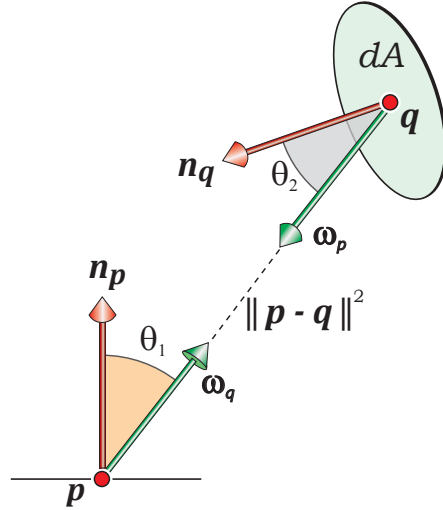
$$d\omega = \frac{\cos \theta dA}{d^2} \quad (3.2)$$

Burada dA , $d\omega$, d ve θ Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir.

Görüntü oluşturma denkleminin katı açı formunun yüzey elemanlarına göre düzenlenmiş hali, Eşitlik 3.3'de verilmiştir.

$$L_o(\mathbf{p}, \omega_o) = L_e(\mathbf{p}, \omega_o) + \int_A \rho(\mathbf{p}, \omega_q, \omega_o) L_o(\mathbf{q}, \omega_p) V(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|^2} dA \quad (3.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan parametreler Şekil 3.2'de gösterilmiştir. $V(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ ise görünürlük testine ilişkin bir fonksiyonu ifade etmektedir. Şekil 3.2'de de görüldüğü gibi, A yüzeyindeki \mathbf{q} noktasından \mathbf{p} noktasına ω_q yönünde gelip ω_o yönünde yansıyan ışığın etkisi, yüzey elemanları üzerinde entegrasyon yapılarak hesaplanabilir. Bu eşitlikte yüzey elemanından gelen ışığın \mathbf{p} noktasına ulaşip ulaşmadığının belirlenmesi için görünürlük testine ($V(\mathbf{p}, \mathbf{q})$) ihtiyaç vardır.



Şekil 3.2. Görüntü oluşturma denkleminin alansal formu (Suffern, 2007).

3.3 Neumann Serisi

Görüntü oluşturma denklemi incelenirse, eşitliğin her iki tarafında da hesaplanması istenilen fonksiyon (L_o) görülmektedir. Bu tür integraller iteratif olarak çözülebilir. Neumann açılımı (Arfken and Weber, 2005) bu denklemin sonsuz seriler ile ifade edilerek iteratif bir şekilde çözülmesini sağlar.

$$L(\mathbf{x}, \omega_o) = L_0(\mathbf{x}, \omega_o) + L_1(\mathbf{x}, \omega_o) + \dots \quad (3.4)$$

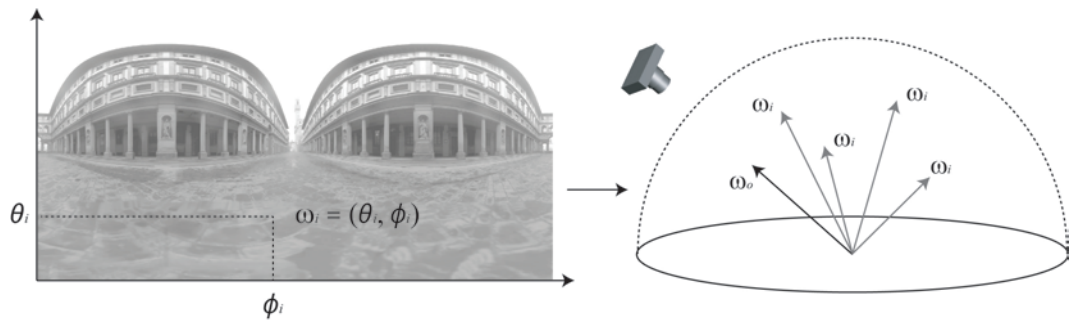
$L_0(\mathbf{x}, \omega_o)$, \mathbf{x} noktasından ω_o yönünde doğrudan yansıyan ışıktır. Grafik donanımında pikselleştirme ile kolaylıkla hesaplanabilir. $L_1(\mathbf{x}, \omega_o)$ terimi ise tek bir yansıma yaparak \mathbf{x} noktasına gelen ve ω_o yönüne yansıyan toplam ışıktır.

$$L_i(\mathbf{x}, \omega_o) = \int_{\Omega^+} \rho(\omega_i, \mathbf{x}, \omega_o) L_{i-1}(\mathbf{x}, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad (3.5)$$

Bu bağıntıya göre, i yansıma yaparak \mathbf{x} noktasına gelen ışınların ω_o yönüne ne kadarının yansıdığı $i - 1$. yansımadan gelen toplam ışığa bağlıdır. Enerjinin korunumu yasasına göre yansıyan enerji her zaman gelen enerjiden küçük ya da eşit olması gerekir. Bu da ışığın yansıma sayısı arttıkça son görüntüye olan etkisinin azaldığı anlamına gelir.

3.4 Çevresel Işık Kaynakları

Çevresel ışıklandırma yöntemi ilk olarak Blinn and Newell (1976) tarafından öne sürüldü. Bu yöntemde ışığın çok uzak bir ortamdan geldiği varsayımı dikkate alınmıştır. Bir nesne ile çevresel ışık arasındaki mesafe nesnenin boyutuna göre çok büyük olduğunda, gelen ışık yönlü olarak kabul edilebilir. Bu durumda çevresel ışık kaynağının sonsuzda bulunduğu düşünülebilir. Bu varsayım altında, gelen ışık, *Çevresel Işık* adı verilen 2 boyutlu bir görüntü olarak saklanır. Bu görüntü Şekil 3.3’de gösterildiği gibi gelen ışık, yönlü ışık olarak kabul edilir ve böylece örneklenebilir bir görüntü saklanır. Görüntü oluşturma, izleyiciye doğru (ω_o) yansıyan ışık miktarını hesaplamayı gerektirir. Bu, tüm yönlerden (ω_i) gelen ışığın dikkate alınmasını gerektirir.



Şekil 3.3. Çevresel ışıklandırma ve parametrisasyonu.

3.5 Noktasal Işık Kaynakları

Noktasal ışık kaynakları fiziksel olarak mümkün olmayan fakat matematiksel olarak kolaylıkla hesaplanabilen her yöne eşit şiddette ışık veren ışık kaynaklarıdır. I şiddetinde ışık veren bir noktasal ışık kaynağının radyant akısı, Φ , ışık şiddetinin birim küre üzerindeki integrali ile hesaplanabilir:

$$\Phi = \int_{4\pi} I d\omega = 4\pi I \quad (3.6)$$

Noktasal ışık kaynağı çevresine r yarıçaplı bir küre konulduğunda bu küre üzerine düşen toplam radyant akının sabit kalması gerekir. Bu durumda küre yüzeyine düşen radyans Eşitlik 3.7'de verildiği gibi olmalıdır.

$$E = \frac{\Phi}{4\pi r^2} = \frac{I}{r^2} \quad (3.7)$$

Eşitlikten anlaşılacağı gibi noktasal ışık kaynağından uzaklaşıldığında ışığın şiddeti uzaklığın karesi ile ters olarak azalır. Buna zayıflama denir. Görüntü oluşturma denkleminde gelen ışık L_i yerine noktasal ışık kaynağı konulduğunda, noktasal ışık sadece tek bir yönden ışık verebileceği için yansıyan ışığın hesaplanmasındaki tümleştirme ortadan kalkar:

$$L_o(\mathbf{p}, \omega_o) = L_e(\mathbf{p}, \omega_o) + \rho(\mathbf{p}, \omega_l, \omega_o) \frac{I}{r^2} \cos \theta_l \quad (3.8)$$

3.6 Çevresel Işık Altında Doğrudan Yansımalar

Işık kaynağı olarak çevresel ışık kullanıldığında ve sahnedeki ışık yayan nesnelere ihmal edildiğinde, görüntü oluşturma denklemi, noktasal ışık altındaki ikinci yansımalar denkleminde benzerdir.

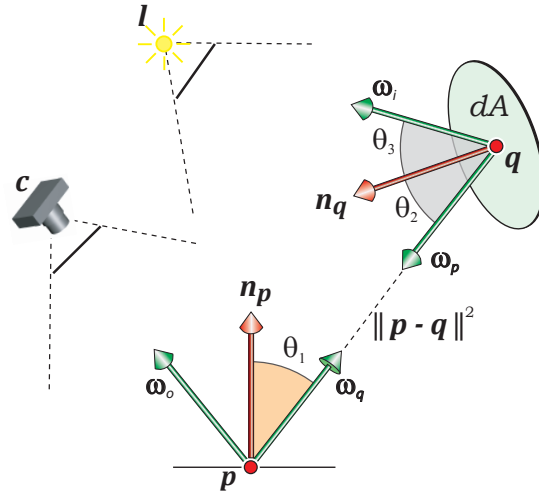
$$L_o(\mathbf{p}, \omega_o) = \int_{\Omega^+} \rho(\mathbf{p}, \omega_i, \omega_o) L_i(\omega_i) V(\mathbf{p}, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad (3.9)$$

Denkleminde gelen ışık (L_i), ışıklandırmanın yapıldığı p noktasından bağımsızdır. Noktasal ışık kaynaklarının ikinci yansımalarında olduğu gibi çift katlı bir integral gerekmektedir ve ışığın p noktasından ω_i yönünde görülüp görülmediğini belirten görünürlük testine (V) ihtiyaç duyar.

3.7 Noktasal Işık Altında İkinci Yansımalar

Sahnedeki ışık yayan yüzeyler ihmal edildiğinde Şekil 3.4’de de görüldüğü gibi, tek bir noktasal ışık kaynağından çıkıp A yüzeyinden yansırarak p noktası üzerinden kameraya gelen toplam radyans Eşitlik 3.10’da verildiği gibi hesaplanır.

$$L_o(\mathbf{p}, \omega_o) = I \int_A \rho(\mathbf{p}, \omega_q, \omega_o) \rho(\mathbf{q}, \omega_i, \omega_p) V(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3}{\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|^2 \|\mathbf{l} - \mathbf{q}\|^2} dA \quad (3.10)$$



Şekil 3.4. Noktasal ışık kaynağının oluşturduğu ikinci yansımalar (Suffern, 2007).

Noktasal ışık kaynaklarının ikinci yansımaları için hesaplanması gereken integral (Eşitlik 3.10), çevresel ışık kaynaklarının doğrudan ışıklandırması için hesaplanması gereken integrale (Eşitlik 3.9) çok benzemektedir. İki eşitlik arasında farklı olarak ikinci yansıma denkleminde ikinci bir BRDF fonksiyonu, görünürlük testi ve biraz daha karmaşık bir geometrik terim bulunmaktadır.

Bu denklemde verilen integralin sahnedeki her yüzey için hesaplanması gerekmektedir. Fakat sahnede ışık almayan yüzeyler için bu integralin etkisi yoktur. Noktasal ışık kaynağı kullanıldığında sahnede ışık alan yüzeyler kolaylıkla hesaplanabilir. Şekil 3.4’teki gibi ışık kaynağı önüne konulan bir düzleme, sahnedeki nesnelere izdüşümü basit bir dönüşümle hesaplanabilir. Dönüşümden sonra 3 boyuttan 2 boyuta indirgenmiş nesnelere sadece ışığa yakın noktaları alındığında, sadece ışıktan görünen nesnelere için gerekli tüm değerler (konum, normal, BRDF parametreleri) 2 boyutlu düzlem üzerinde parametrize edilebilir. Bu işlem ekran kartında rasterizasyon ile kolaylıkla yapılabilir. Dachsbacher ve Stamminger (2005) çalışmalarında

bu yöntemi kullanmışlardır. Fakat, önerdikleri yöntemde integralin hesabı için örnek türetmeye sezgisel yaklaşılmış ve görünürlük testleri dikkate alınmamıştır.

3.8 Monte Carlo Tümeleşirme

Görüntü oluşturmanın hedefi, izleyiciyi tarafından görünen her yüzey noktası için yansıyan radyansı hesaplamaktır. Bu amaçla görüntünün her pikselinde görüntü oluşturma denkleminin hesaplanması gerekir. Bu denklemdeki integralin analitik bir çözümü bulunmamaktadır. Ayrıca bu integral çok boyutlu bir yapıdadır. Bu türdeki integrallerin değerleri alan hesabı yöntemiyle (*quadrature*) çözülsede bu işlem son derece maliyetlidir. Bunun yerine bu tür analitik çözümü bulunmayan integrallerin çözümünde nümerik yaklaşımlar uygulanmaktadır. Monte Carlo tümeleşirme de bu amaçla kullanılan stokastik bir yöntemdir.

$$I(f) = \int_{\chi} f(x) dx \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.11'deki χ tanım kümesinde tanımlı $f(x)$ fonksiyonunun integrali hesaplanırken bilinen bir $p(x)$ dağılımından gelen x değişkeni için $\frac{f(x)}{p(x)}$ fonksiyonunun beklenen değeri tahminlemesi kullanılır. $p(x)$ dağılımından gelen birbirinden bağımsız bir $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ kümesi için integralin nümerik değeri Eşitlik 3.12'de verildiği gibi hesaplanır.

$$I(f) \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f(x_i)}{p(x_i)} = F_n \quad (3.12)$$

$p(x)$ dağılımından gelen X örnekleri için $\left\{ \frac{f(x)}{p(x)} \right\}$ 'in beklenen değeri aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$\int_{\chi} f(x) dx = \int_{\chi} \frac{f(x)}{p(x)} p(x) dx = E \left[\frac{f(x)}{p(x)} \right] \quad (3.13)$$

3.9 Monte Carlo Tümeleşirmesinde Etkinlik

Monte Carlo integrasyonunun etkinliği, beklenen değer tahminleyicisinin varyansına bağlıdır. Varyans ne kadar yüksekse hata oranı o kadar artar. Tahminleyicide n örnek kullanıldığında, tümeleşirme sonucuna yakınsama $O(\sqrt{n})$ karmaşıklığında olmaktadır. Bu nedenle hata oranını yarıya indirmek için 4 kat daha fazla örnek kullanmak gerekmektedir (Pharr and Humphreys, 2010).

3.10 Önemine Göre Örnekleme

Önemine göre örnekleme, Monte Carlo nümerik integrasyonundaki hata oranını azaltmayı hedefleyen bir yöntemdir.

Monte Carlo tahminleyicisindeki $p(x)$ olasılık dağılım fonksiyonunun integrali alınmak istenen $f(x)$ fonksiyonuna olabildiğince yakın seçilmesi ile varyans düşmektedir. Bu durum şöyle gösterilebilir (Robert and Casella, 2005): c bir sabit olmak üzere $p(x) = c f(x)$ ise $F_n = \frac{p(x)}{c f(x)} = \frac{1}{c}$ olmakta ve dolayısıyla varyans $Var [F_n] = E [F_n^2] - E [F_n]^2 = \frac{1}{c^2} - \frac{1}{c^2} = 0$ olmaktadır. Bu sebeple $p(x)$ olasılık dağılım fonksiyonunun $f(x)$ denkleminde benzerliği arttıkça, nümerik integrasyon yönteminin varyansı düşmektedir.

3.10.1 Kümülatif olasılık dağılım fonksiyonlarına dayalı örnekleme

Olasılık dağılım fonksiyonlarından örnek türetmek için kullanılan genel tekniklerden biri de kümülatif dağılım fonksiyonunun tersi bulunarak örneklemeye yöntemidir. $[a, b]$, $(a, b \in \mathbb{R})$ aralığında tanımlı bir olasılık dağılım fonksiyonu, $p(x)$ 'e sahip bir dağılımdan gelen X şans değişkeni için, Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (*Cumulative Distribution Function - CDF*), $F(x)$ kullanılarak bu dağılımdan rastgele şans sayıları türetilmektedir (Robert and Casella, 2005).

$F(x) = \int_{-\infty}^x p(t) dt$ ve $\xi, [0, 1]$ aralığında bir uniform dağılımdan seçilen şans sayısı ise $x_i = F^{-1}(\xi_i)$ şeklinde elde edilen x_i şans sayıları bu dağılımdan gelmektedir.

Bu yöntem, çok boyutlu dağılımlar için de kullanılabilir. Bu amaçla dağılım tek boyutlu dağılımların çarpımı şeklinde ifade edilmelidir. $p(x, y) = g(x)h(y)$ şeklinde bağımsız şans değişkenlerinin bileşik olasılık dağılımları için, her iki dağılımdan birbirinden bağımsız olarak örnek türetmek yeterlidir. Eğer değişkenler bağımlıysa, öncelikle;

$$p_1(x) = \int p(x, y) dy \quad (3.14)$$

şeklinde marjinal yoğunluk fonksiyonu hesaplanıp bu dağılımdan x şans sayısı türetilmelidir. Daha sonra x bilindiğinde y 'nin şartlı olasılık dağılım fonksiyonu;

$$p(y|x) = \frac{p(x, y)}{p_1(x)} \quad (3.15)$$

şeklinde hesaplanarak bu dağılımdan da y şans sayısı türetilmektedir.

Bu yöntem tersi alınabilir analitik kümülatif dağılım fonksiyonlarına sahip sü-

rekli dağılımlar için kullanılabilirken, kesikli dağılımlarda kullanabilmek için, dağılımın tanım kümesindeki her x değeri için kümülatif değerleri bir dizide saklanmalıdır. Daha sonra ξ_i değerlerinin bu dizideki konumu ikili arama algoritmasıyla $O(\log n)$ zamanda kolaylıkla bulunabilir.

3.10.2 Çoklu önemine göre örnekleme

Işıklandırmada kullanılan integraller, bir dizi fonksiyonun çarpımından oluşmaktadır. Öneme göre örneklemede kullanmak amacıyla, çarpım şeklindeki fonksiyonlara benzer bir dağılımı hızlı bir şekilde oluşturmak literatürde incelenmiş maliyeti yüksek bir problemdir (Burke et al., 2005; Talbot et al., 2005; Clarberg et al., 2005a; Ng et al., 2004; Cline et al., 2006; Clarberg and Akenine-Möller, 2008). Çarpımı oluşturan fonksiyonlardan sadece birine benzer bir dağılımdan örnek türetmek en basit yaklaşımlardan biri olsa da oluşturulan görüntüdeki gürültü artmaktadır. Bu amaçla sadece BRDF'ten (Bilgili et al., 2011; Lawrence et al., 2004; Ward, 1992) ya da sadece çevresel ışıktan (Debevec, 2005; Agarwal et al., 2003; Ostromoukhov et al., 2004; Kollig and Keller, 2003) örnek türetmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır.

Literatürde öne sürülen bir başka yöntemde (Veach, 1998) ise görüntülerdeki gürültüyü azaltmak amacıyla çarpım halindeki fonksiyonlardan dağılım oluşturmak yerine her dağılımdan ayrı örnekler türetilerek bu örnekler farklı ağırlıklarla kullanılmıştır. Bu yöntem çoklu önemine göre örnekleme (*Multiple Importance Sampling, MIS*) olarak bilinir ve bu yöntemde çarpımı oluşturan dağılımlardan birinden üretilen örnekler için her iki dağılımdaki olasılıkların hesaplanabilmesi gerekmektedir.

4. IŞIK TAŞIMA (*LIGHT TRANSPORT*)

Görüntü oluşturma denklemindeki integralin sadece çok basit sahneler için açık bir çözümü bulunur. Bu nedenle bu integral Monte Carlo integrasyonu gibi nümerik tahminleme yöntemleriyle çözülmektedir. Bu bölümde Monte Carlo integrasyonuna dayanan bu çalışmaların genel prensipleri ışınsallık, ışın yolu izleme, çift yönlü ışın yolu izleme ve foton haritalama başlıkları altında açıklanacaktır.

4.1 Işınsallık (*Radiosity*)

Işınsallık; bilgisayar grafiklerinde global ışıklandırma amacıyla kullanılan, sonlu elemanlar yöntemine dayanan bir yöntemdir. Monte Carlo integrasyonuna bağlı diğer yöntemlerin aksine ışınsallık sadece ışık kaynağından çıkıp bir ya da daha fazla defa mat yüzeylerden yansarak göze ulaşan ışın yollarını dikkate alır. Bu tür ışın yolları literatürde “LD*E” olarak adlandırılır. Işınsallık algoritmasında, mat yüzeylerden yansıyan ışık da, ışık kaynağı olarak kabul edilir. Bu nedenle her yüzey için hesaplanan yansıyan ışık şiddeti değerleri kamera bakış açısından bağımsızdır. Hesaplama maliyeti yüksek olsa da her bakış açısı için kullanılacak sonuçlar üretir. Bu nedenle interaktif uygulamalarda sadece statik sahneler için bir kere hesaplanır.

Sahnedeki her yüzey, bir ya da daha fazla sayıda yeterince küçük parçalara ayrılır. Her parça ikilisi için bir görünürlük faktörü hesaplanır. Görünürlük faktörleri, bu iki parçanın birbirini ne kadar iyi görebildiğini tanımlayan katsayılardır. Birbirinden uzak parçalar, ya da birbirlerine dik açı yapacak şekilde konumlanmış parçaların görünürlük faktörü daha düşük olacaktır. İki parça arasında görünürlüğü engelleyen başka bir parça bulunuyorsa, bu iki parçanın görünürlük faktörü engelleme miktarına göre sifıra yaklaşacaktır.

Görünürlük faktörleri, görüntü oluşturma denkleminin doğrusallaştırılmış bir şeklinin katsayıları olarak kullanılmaktadır. Bu faktörler lineer denklem sistemi oluşturur. Bu denklemin çözümü her bir parçanın ışınsallığını karşılıklı yansımalara ve gölgelere dikkat ederek hesaplar.

Işınsallık, termal radyasyon teorisi üzerine kurulmuştur. Yüzey parçaları arasında taşınan radyant enerji miktarının hesaplanmasına dayanır. Hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla, yöntem tüm yüzeylerin enerjisi heryöne eşit miktarda dağıttığı, yada bir başka deyişle yüzeylerin tamamıyla mat oldukları varsayımını kabul eder. Sahnedeki yüzeyler genellikle her parçasında sabit bir ışınsallık değeri kulla-

nilabilecek şekilde dikdörtgensel ya da üçgensel parçalara ayrılır.

Parçalara bölme işleminden sonra transfer edilen radyant enerji miktarı, yüzeyin bilinen yansıtma katsayısı ve diğer yüzeylerle yaptığı görünürlük faktörleri kullanılarak hesaplanır.

Tanımlanacak olursa, B ışınsallığı, yüzey parçacığının birim alanından birim zamanda ayrılan yayılan ve yansıyan enerjilerin toplamıdır:

$$B(\mathbf{x}) dA = E(\mathbf{x}) dA + \rho(\mathbf{x}) dA \int_s B(\mathbf{x}') \frac{1}{\pi r^2} \cos \theta_x \cos \theta_{x'} V(\mathbf{x}, \mathbf{x}') dA' \quad (4.1)$$

Eşitlikte $B(\mathbf{x}) dA$, \mathbf{x} noktası üzerindeki birim alandan (dA) ayrılan toplam enerjidir. $E(\mathbf{x}) dA$, bu noktadan yayılan enerji ve $\rho(\mathbf{x})$ bu noktadaki yansıtma katsayısıdır. S , sahnedeki yüzeyleri ifade etmektedir ve \mathbf{x}' noktası bu yüzeyler üzerindedir. r , \mathbf{x} ile \mathbf{x}' arasındaki uzaklıktır. θ_x ve $\theta_{x'}$ ise bu iki noktayı birleştiren doğrunun bu iki noktadaki yüzey normalleri ile yaptığı açılarıdır. $V(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$, görünürlük fonksiyonudur, \mathbf{x} noktası \mathbf{x}' noktasını doğrudan görebiliyorsa 1 göremiyorsa 0 değerini alır.

Yüzeyler sabit ışınsallık (B_i) ve yansıtma katsayısına (ρ_i) sahip sonlu sayıda düzlemsel parçalara bölünürse, yukarıdaki eşitlik kesikli ışınsallık denkleminde dönüşür.

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n F_{ij} B_j \quad (4.2)$$

Eşitlikte F_{ij} , i . ve j . yüzey parçası arasında tanımlı görünürlük faktörüdür. Bu eşitlik matris şeklinde yazılıp, vektör sonucu verecek şekilde çözülebilir:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{I} - \rho\mathbf{F})^{-1}\mathbf{E} \quad (4.3)$$

Bu denklem, sonsuz yansıtma için doğrudan çözüm üretir. Fakat, bu denklemin çözümünün hesaplama maliyeti yüzey parçası sayısının kübü ile doğru orantılıdır. Yeterli kalitede sonuç alabilmek için sahne çok sayıda yüzeye bölünmelidir ve bu da hesaplama maliyetinin oldukça yükseltir.

Denklem sistemi çözümü yerine, Eşitlik 4.2'de verilen yansıtma ışınsallık denklemini kullanılarak iteratif olarak çözüm bulunabilir. Usulen bu çözüm, denklemin Jacobi iterasyonu ile çözülmesine denk gelmektedir. Yüzeylerin yansıtma katsayıları, ρ_i , 1'den küçük olduğu için bu Jacobi iterasyonu hızlı bir şekilde sonuca yakınsar.

4.2 Işın Yolu İzleme

Işın yolu izleme, bilgisayar grafiklerinde üç boyutlu sahnelerin gerçekçi ışıklandırılmasının hesaplamasında kullanılan Monte Carlo entegrasyonuna dayalı bir yöntemdir. Algoritma, temelde nesne üzerindeki tek bir noktaya ulaşan toplam ışığı hesaplar. Bu noktaya ulaşan ışık, daha sonra nesnenin malzemesini modelleyen BRDF kullanılarak kamera yönüne yansıtılır. Bu prosedür görüntüdeki tüm pikseller için gerçekleştirilir. Kullanılan BRDF, ışık ve kamera modelleri fiziksel gerçeklik sağlıyorsa, oluşan görüntüler fotoğraf kalitesinde olmaktadır.

Işın yolu izleme diğer yöntemlere manuel olarak eklenmesi gereken, alan derinliği, yumuşak gölgeler, hareket bulanıklığı, kırılmalar, çevresel perdeleme ya da dolaylı ışıklandırma gibi etkileri doğal olarak içerir. Bu nedenle bu etkileri içeren bir görüntü oluşturma uygulamasının geliştirilmesi, ışın yolu izleme yöntemi ile daha kolay olmaktadır.

Diğer görüntü oluşturma yöntemlerinin kalitesini karşılaştırmak amacıyla oluşturulan referans görüntüler ışın yolu izleme yöntemi ile oluşturulur. Bunun nedeni ışın yolu izleme yönteminin kesin ve yansız sonuçlar üretmesidir. Işın yolu izleme yöntemi ile yüksek kalitede görüntü oluşturmak için çok sayıda örnek üretmek gerekmektedir.

Işın yolu izleme yönteminin yalancı kodu Algoritma 1’de verilmiştir. Bu algoritma tek bir ışın yönü için ışık şiddetini hesaplar. Bir pikselden görünen renk değeri hesaplanırken, o piksele denk gelen ışın yönü örnekleri türetilir ve bu yönler için Algoritma 1’nin sonuçlarının ortalaması alınır.

4.3 Çift Yönlü Işın Yolu İzleme

Işın yolu izleme iki farklı yol ile gerçekleştirilebilir. Işınlardan başlayarak kameraya doğru izlenebilir ya da kameradan başlayıp ışık kaynağına doğru izlenebilir:

Işık kaynağından başlayan ışınların oluşturduğu ışın yolları sahnede izlenerek rasgele sayıda yansıma ulaşınca kamera konumu ile birleştirilir. Görüntü oluşturma sırasında böyle milyonlarca yol oluşturulur. Her yol, denk geldiği piksellere etki edecek şekilde ortalamaları alınarak görüntü oluşturulur.

Kameradan başlayan ışınlarda ise her piksel için önceden belirlenmiş bir sa-

Algoritma 1 Renk Yol İzle(Işın *ışın*, *derinlik*)

```

if derinlik == maxDerinlik then
  return Siyah
end if

```

```

ışın.enYakınNesneyiBul()
if ışın.nesneYoksa then
  return Siyah
end if

```

```

Işın yeniIşın
yeniIşın.merkez ← ışın.kesişimNoktası
yeniIşın.yön, örnekOlasılığı ← YarıküreÖrnekle(ışın.kesişimNormali)
lambert ← İçselÇarpım(yeniIşın.yön, ışın.kesişimNormali)

```

```

Malzeme m ← ray.hitMaterial
Renk yayılan ← m.yayılan
Renk BRDF ←  $\rho$  (ışın.yön, yeniIşın.yön) × lambert/ örnekOlasılığı
Renk yansıyan ← Yol İzle(yeniIşın, depth + 1)
return yayılan + BRDF × yansıyan;

```

yıda yol oluşturulup ortlamaları alınır. Her yol herhangi bir ışık kaynağına ya da belirli bir yansıma sayısına ulaşana kadar izlenir. Işık kaynağına ulaşan yollar geriye doğru izlenerek kameraya ulaşan ışık şiddeti hesaplanır.

Her iki yöntemin de verimli ve verimsiz çalıştığı durumlar vardır. Işık kaynağı sahneyi çok küçük bir aralıktan aydınlatıyorsa, kameradan başlayan yolların ışık kaynağına ulaşmaları çok zordur. bu durumda ilk yöntem verimsiz çalışırken ikinci yöntem daha verimli çalışmaktadır. Ancak, kamera sahneyi dar bir aralıktan görüyorsa, bu durumda tam tersi bir sonuç söz konusudur. kameradan başlayan ışın yollarının ışık kaynağına ulaşma ihtimali daha fazladır.

Çift yönlü ışın yolu izleme yöntemi yukarıda bahsedilen her iki yöntemi tek bir algoritma üzerinde birleştirir. Bu yöntemde kameradan ve ışıktan başlayıp daha hedefine ulaşmamış ayrı yollar oluşturulur. Daha sonra bu yollar birleştirilerek kamera ve ışık kaynağını birleştiren yeni yollar oluşturulur. Bu yöntem her koşulda her iki yöntemden de daha iyi sonuçlar üretmektedir. İlk bakışta bu yöntemin daha yavaş çalışacağı düşünülse de, ışın yolu izleme yöntemine göre çok daha az örnekte sonuca yaklaştığı için pratikte ışın yolu izleme yönteminden daha hızlı çalışmaktadır.

4.4 Foton Haritalama

Foton haritalama yöntemi Jensen (1996) tarafından öne sürülmüş bir global ışıklandırma yöntemidir. Işın yolu izleme yöntemi ile aynı parametreler kullanılarak oluşturulmuş görüntülerin ortalaması alındığında gerçek sonuca yakınsar daktat foton haritalama yönteminde bu geçerli değildir. Bu tür algoritmalar *yanlı* olarak isimlendirilir.

Foton haritalama yöntemi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada ışık kaynaklarından sahneye fotonlar fırlatılır. Fotonlar yüzeylere ulaştığında belirli bir olasılıkla soğurulur, yansır ya da kırılır. Yansıma ya da kırılma durumunda yeni fotonlar oluşturulur ve sahnede ışık yolunu izlemeye devam eder. Oluşturulan tüm fotonlar, ışık şiddeti ve ışığın geliş yönü ile birlikte hiyerarşik uzaysal bir veri yapısında saklanır. Bu uzaysal veri yapısına foton haritası denir.

İkinci aşamada her piksel için kamera konumundan başlayan bir ışın üretilir. Bu yöndeki en yakın nesne ışın izleme yöntemleri ile bulunur. Daha önce oluşturulmuş olan foton haritasından ışının kesişim noktasına en yakın n foton sorgulanır. Bu fotonların ışık şiddeti konumu ve gelen ışık yönleri kullanılarak bu noktadan yansıması beklenen ışık şiddeti tahmin edilir.

5. LİTERATÜR ÖZETİ

Dolaylı ışıklandırma ya da ikinci yansımaların hesaplanması konusunda önerilen çalışmalar Önceden Hesaplanmış Parlaklık Transferi (*Precomputed Radiance Transfer - PRT*), Sanal Noktasal Işık Kaynakları (*Virtual Point Lights - VPL*), Sanal Alansal Işık Kaynakları (*Virtual Area Lights - VAL*), Ekran Uzayı Yöntemleri ve Sonlu Elemanlar Yöntemleri (*Finite Elements Methods - FEM*) şeklinde başlıklar altında incelenebilir.

5.1 Önceden Hesaplanmış Radyans Transferi

Ortam ışıkları, ortogonal baz fonksiyonları (Küresel Harmonikler (*Spherical Harmonics - SH*) (Sloan et al., 2002), dalgacıklar (*wavelets*) (Ng et al., 2003, 2004), radyal taban işlevleri (*radial basis functions*) (Tsai and Shih, 2006), küresel parçalı sabit baz işlevleri (*spherical piecewise constant basis functions*) (Xu et al., 2008)) cinsinden ifade edilebilir. Statik bir sahnede ışık transferi baz fonksiyonları kullanılarak önceden hesaplanır.

$$L_{env}(\omega) \approx \sum_i l_i B_i(\omega) \quad (5.1)$$

Sahnenin mat malzemelerden oluştuğu düşünülüğünde doğrudan ışıklandırma denklemi baz fonksiyonlar cinsinden ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} L_0(\mathbf{x}) &= \frac{k_d}{\pi} \int_{\Omega^+} L_{env}(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \\ L_0(\mathbf{x}) &\approx \frac{k_d}{\pi} \int_{\Omega^+} \sum_j l_j B_j(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \\ L_0(\mathbf{x}) &\approx \sum_j l_j \frac{k_d}{\pi} \int_{\Omega^+} B_j(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \end{aligned} \quad (5.2)$$

Bu durumda eşitliğin içindeki sadece sahneye bağlı olan integral önceden hesaplanırsa ışıklandırma iki vektörün içsel çarpımı olarak ifade edilebilir:

$$L_0(\mathbf{x}) \approx \langle \mathbf{l}, \mathbf{t}_x^0 \rangle \quad (5.3)$$

Dolaylı ışıklandırmadaki diğer yansımalar için de aynı işlem uygulanırsa çevresel ışıklandırma sahneye bağlı bir \mathbf{t} vektörü ile ışığa bağlı bir \mathbf{v} vektörünün içsel çarpımı olarak gösterilir:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}) &= L_0(\mathbf{x}) + L_1(\mathbf{x}) + \dots \\ L(\mathbf{x}) &\approx \langle \mathbf{l}, \mathbf{t}_x^0 + \mathbf{t}_x^1 + \dots \rangle \\ L(\mathbf{x}) &\approx \langle \mathbf{l}, \mathbf{t}_x \rangle \end{aligned} \quad (5.4)$$

Mat yüzey sınırlandırılması kaldırıldığında bu içsel çarpım matris \times vektör çarpımına dönüşmektedir.

Önceden hesaplanmış radyans transferinin avantajları ve dezavantajları şu şekilde verilebilir:

- Hızlı dolaylı ışıklandırma.
- Baz vektörleri düşük frekanslı fonksiyonları modelleyebildiği için, parlak yüzeylerin modellenebilmesi için çok sayıda katsayı ve sıkıştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.
- Sahneye bağlı olan integraller önceden hesaplandığı için sadece statik sahnelerde kullanılabilir.

5.2 Sanal Noktasal Işık Kaynakları

Sahnedeki doğrudan ışık kaynaklarından gelen ışığın yansıma noktalarında bulunan yarımküresel ışık kaynaklarına sanal noktasal ışık kaynakları denir. Sanal noktasal ışık kaynakları, sahnedeki dolaylı ışığı ifade etmek için kullanılır. Sahne ışıklandırılırken her noktada doğrudan ışığın yanı sıra VPL'lerden gelen dolaylı ışıkların toplamı da hesaplanmaktadır. Anında Işınsallık (*Instant Radiosity - IR*), Artımsal Anında Işınsallık (*Incremental Instant Radiosity - IIR*), Kusurlu Gölge Dokuları (*Imperfect Shadow Maps - ISM*) yöntemleri kendi içlerinde VPL kullanmaktadır.

5.2.1 Anında Işınsallık

Sahnenin sadece mat yüzeylerden oluştuğu varsayılarak, ışık kaynaklarından başlayıp rastgele yansıtılan ışık yolları hesaplanır (Keller, 1997). Hesaplanan bu ışık yollarının uç noktalarına yerleştirilen her VPL için görünürlük testinde kullanılmak üzere gölge dokusu hesaplanır. Son olarak görünürlük bilgisiyle birlikte sahne bu VPL'ler aracılığıyla ışıklandırılır. Böylece dolaylı ışıklandırma sağlanmış olur.

5.2.2 Artımsal Anında Işınsallık

Anında ışınsallık yönteminde görünürlük testi amacıyla oluşturulan gölge dokuları darboğaza neden olmaktadır. Artımsal anında ışınsallık yöntemi (Laine et al., 2007) ile dinamik ışıklandırma altındaki statik sahnelerde, iki kare arasındaki tutarlılık bilgisini kullanarak gölge dokularının tekrar kullanılması sağlanmıştır.

Her karede:

- Geçersiz VPL'ler silinir.
- Var olan VPL'ler yeni ışık konumuna göre iki boyutlu tanım uzayına tekrar iz düşürülür.
- Bütçeye göre VPL sayısı ayarlanır.
- VPL'ler kullanılarak ışıklandırma yapılır.

5.2.3 Kusurlu Gölge Dokuları

Kusurlu gölge dokuları (Ritschel et al., 2008) iki önemli gözleme dayanır, Çoğu sahnede dolaylı ışıklandırmanın frekansı düşüktür ve her VPL'in sahneye bireysel etkisi düşüktür. Bu durumda düşük kalitede gölge dokularının kullanılması yeterlidir. Standart gölge dokuları üçgenler kullanılarak oluşturulurken, kusurlu gölge dokuları yüzeylerden örneklenmiş noktalar kullanılarak oluşturulur. Daha sonra oluşturulan bu gölge dokusundaki eksikler genişletme (*dilation*) ve aşındırma (*erosion*) yöntemleri kullanılarak tamamlanır. Kusurlu gölge dokularının hesaplanması standart gölge dokularından çok daha hızlı yapılabilir.

5.3 Sanal Alansal Işık Kaynakları

Sanal alansal ışık kaynakları yöntemi de sanal noktasal ışık kaynakları gibi mat yüzeylerin ışıklandırılması için geliştirilen bir yöntemdir (Dong et al., 2009). Bu yöntemde de sanal noktasal ışık kaynakları yöntemindeki gibi VPL'ler oluşturulur. VPL'ler daha sonra birbirlerine yakınlık ve yüzey normallerine göre kümelendirilip alansal ışık kaynakları oluşturulur. Alansal ışık kaynakları için yumuşak gölgelendirme yöntemlerinden biri kullanılarak ışıklandırma gerçekleştirilir.

5.4 Ekran Uzayı Yöntemleri

Ekran uzayı yöntemleri sahnede sadece kamera tarafından görünen bilgileri kullanarak işlem yapan yöntemlerdir. Ekran uzayı yöntemlerinde kameradan görünen yüzeylerin derinlik, konum, normal vb. bilgileri saklanır. Daha sonra bu bilgiler kullanılarak ışıklandırma dahil birçok görsel efekt sahne karmaşıklığından bağımsız olarak uygulanabilir. Ekran Uzayı Çevresel Perdeleme (*Screen Space Ambient Occlusion - SSAO*) ve Yansıtıcı Gölge Dokuları (*Reflective Shadow Maps - RSM*) ekran uzayı yöntemleri altında incelenebilir.

5.4.1 Ekran Uzayı Çevresel Perdeleme

Çevresel perdeleme yöntemleri (Mittring, 2007) ortamın ne kadarının yüzey tarafından görüldüğünü hesaplayarak yumuşak gölgelendirilme sağlar. Bu aynı zamanda noktanın ulaşılabilirliği olarak da bilinir.

Çevresel perdeleme değeri şu şekilde hesaplanır:

$$A = 1 - \frac{1}{\pi} \int_{\Omega^+} V(\omega) W(\omega) (\omega \cdot \mathbf{n}) d\omega \quad (5.5)$$

- A : Çevresel Perdeleme
- V : Görünürlük testi fonksiyonu
- W : Zayıflatıcı fonksiyon
- \mathbf{n} : yüzey normali

Çevrimdışı yöntemlerde ışın izleme yöntemleriyle görünürlük fonksiyonu hesaplanarak, Monte-Carlo integrasyonu ile çevresel perdeleme hesaplanır. Fakat gerçek zamanlı yöntemlerde bu mümkün değildir.

5.4.2 Yansıtıcı Gölge Dokuları

Ekran uzayında dolaylı ışıklandırma yöntemlerinden biridir. Sadece ikinci yansıma ile sınırlıdır. Gölge dokusunun yanı sıra kameradan görünen ekstra bilgiler saklanır (Dachsbacher and Stamminger, 2005).

5.5 Sonlu Elemanlar Yöntemleri

Görüntü oluşturma denklemindeki integralin çözümünde izlenen iki genel yöntem bulunur: Monte Carlo yöntemleri ve Sonlu Elemanlar Yöntemleri (Heckbert, 1993). Monte Carlo yöntemleri ışın izleme yöntemlerini, Sonlu Elemanlar yöntemleri de ışınsallık yöntemlerini oluşturmaktadır. Sonlu Elemanlar yöntemlerinde ışıklandırma genelde mat yüzeyler için yapılır. Bunun nedeni görüntü oluşturma denkleminin boyutlarının azalmasıdır.

Çevresel ışıklandırma yöntemlerindeki darboğazlardan biri de görünürlük testidir. Örtülü görünürlük yönteminde sahne daha ufak yüzey parçacıklarına ayrılarak sadece birbirini gören yüzeyler arasında enerji değişimi yapılır (Dong et al., 2007; Pellegrini, 1999).

Anti radyans örtülü görünürlük yönteminde görüntü oluşturma denklemi tekrar formüle edilerek görünürlük testi ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır. Işık transferinin yanı sıra negatif ışık transferi de hesaplanarak görünürlük bilgisi sağlanmaktadır (Dachsbacher et al., 2007).

Basamaklı ışık yayılımı hacmi (Kaplanyan and Dachsbacher, 2010) yönteminde de sahne ışık yayılımı hacmi denilen küp parçalara ayrılarak bu küpler arasındaki ışık etkileşimini hesaplanmaktadır. Görünürlük testleri için de aynı küpler üzerinde küresel harmonikler kullanılmıştır.

6. KD-AĞACI KULLANARAK ÇEVRESEL IŞIĞIN ÖRNEKLENMESİ

Çevresel ışıklar gerçekçi görüntüler oluşturma sırasında doğal aydınlatmayı modellemek için kullanılır. Karmaşık gerçekçi aydınlatma ortamları çevresel ışıklar ile verimli bir şekilde temsil edilebilir. Ancak, görüntü tabanlı ışıklandırma altındaki sahnelerden kaliteli görüntü oluşturmak için verimli örnekleme stratejileri kullanmak gerekmektedir. Bu kapsamda sentetik görüntülerde gürültüyü azaltmak için çeşitli örnekleme stratejileri ileri sürülmüştür. Temel örnekleme stratejileri çevresel ışık örnekleme, BRDF örnekleme, çarpım örnekleme ve Çoklu Öneme Göre Örnekleme (*Multiple Importance Sampling - MIS*) (Veach, 1998) içerir.

Öneme göre örneklemenin sadece çevresel ışık, ya da sadece BRDF kullanılarak yapıldığı sentetik görüntülerde düşük gürültü oranlarına ulaşamadığı deneysel olarak gösterilmiştir (Veach, 1998). Çarpım örnekleme gibi her iki fonksiyonun çarpımını örnekleleyen yöntemler (Clarberg et al., 2005b) ise yüksek hesaplama maliyetlerine sahiptir ve Grafik İşlem Birimi (*Graphics Processing Unit - GPU*) donanımında gerçek zamanlı gerçekleştirmeye uygun değildir.

Öte yandan, tahmin edilen ışık şiddetinin varyansı MIS kullanılarak azaltılabilir (Veach, 1998). MIS çevresel ışığı ve BRDF’i ayrı ayrı örnekler ve bu örneklerin olasılık ağırlıklı karışımlarını kullanarak varyansı düşürmeyi hedefler. MIS, GPU donanımında gerçekleştirilebilir bir yöntemdir. Bunun için BRDF’in ve çevresel ışığın GPU donanımında öneme göre örneklenebilmesi gerekir. BRDF’in örneklenebilmesi analitik olarak mümkün olsa da çevresel ışığın örneklenebilmesi daha karmaşık bir problemdir. Bu amaçla, bu tez çalışmasında çevresel ışığın öneme göre örneklenebilmesinin GPU donanımında gerçekleştirilebileceği yeni bir yöntem önerilmiştir.

6.1 Yöntem

Çevresel ışık görüntüsü $w \times h$ boyutlarında dikdörtgensel bir blok olarak tanımlanır. Bu dikdörtgen blok içindeki piksel yoğunlukları bilinmeyen bir çift değişkenli dağılımdan üniform aralık ile örneklenen olasılık yoğunlukları olarak görülebilir. Bu yöntemde çevresel ışık görüntüsündeki piksel yoğunlukları kendi blok toplamlarına göre normalize edilerek deneysel dağılım altında kalan hacmin 1 olması sağlanmıştır.

Önerilen yöntem, çevresel ışık görüntüsünün kd-ağacı yapısı kullanılarak alt bloklara bölünmesine dayanır. Her alt bloğa ait deneysel olasılıklar kendi içerisinde

kalan normalize edilmiş piksel yoğunluklarının toplamına eşittir. Daha sonra bu olasılıklar büyükten küçüğe olacak şekilde sıralanarak, her bloğa bir indeks değeri atanır. Böylece, alt blok indekslerinin bu olasılık grafikleri, alt blok indekslerinin deneysel dağılımı olarak kabul edilebilir. Alt blokların deneysel dağılımının bu şekilde ifade edilmesi, bu deneysel dağılımın basit bir olasılık dağılım fonksiyonu ile modellenmesi için iyi bir ortam sağlar. Son olarak, elde edilen tahmin modeli, gelen ışık için örnek üretmek için kullanılabilir.

6.2 Kd-Ağacı Oluşturma

Çevresel ışık katı açısı cinsinden parametrize edilmiştir. Katı açısı örneği üretmek için kullanılacak $f(\omega)$ dağılımı için $\int_{\Omega} f(\omega) d\omega = 1$ olmalıdır. Değişken değişimiyle katı açısı formundan küresel koordinatlara geçildiğinde $\int_{\Omega} f(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi = 1$ olmaktadır. Bu nedenle küresel koordinatlarda parametrize edilmiş iki boyutlu bir fonksiyonu küresel koordinatlarda tanımlı bir dağılım haline getirmek için fonksiyonun $\sin \theta$ ile çarpılıp normalize edilmesi gerekmektedir.

Çevresel ışık şiddeti fonksiyonu bu şekilde iki boyutlu bir dağılım haline getirildikten sonra kd-ağacı kullanılarak bloklara bölünmektedir. Örnekleme sırasında ise bu bloklardan biri önemine göre seçilerek, seçilen bloktan uniform örnek üretilmektedir.

Olasılık dağılım fonksiyonunun kd-ağacı kullanılarak bloklara bölünmesinin en önemli nedeni önemine göre örnekleme sırasında saklanan veri miktarını azaltmaktır. Diğer bir nedeni ise 2 boyutlu dağılımı tek boyuta indirgeyerek örnekleme kolaylaştırmaktır.

Algoritma 2’de ağaç oluşturulurken kullanılan yöntem görülmektedir. Yöntemde hedeflenen blok sayısına ulaşılan kadar ağaçtaki bloklardan biri seçilip uygun konumdan ikiye bölünmektedir. Bölüm 6.2.1’de alt bloklara bölmek için blok seçiminde izlenen yol, Bölüm 6.2.2’de seçilen bloğun nereden bölüneceği Bölüm 6.2.3’de ise çoklu önemine göre örnekleme desteği anlatılmaktadır.

6.2.1 Bölünecek bloğun seçilmesi

Ağaçta oluşturulan bloklar belirli bir kritere göre sıralanarak bu kritere göre en iyi blok bölünmek üzere seçilmektedir. Sıralama için değişim aralığı, varyans, ve hata kareler toplamı olmak üzere 3 farklı kriter denenmiştir. Bu kriterler aşağıda listelenmiştir.

Algoritma 2 AğaçOluştur(*blokSayısı*)

```

düğüm ← fonksiyonu ifade eden blok
blokListesi.ekle(düğüm)
for i = 2 → blokSayısı do
  düğüm ← düğümSeç(blokListesi)
  blokListesi.çıkart(düğüm)
  [solÇocuk, sağÇocuk] ← düğümBöl(düğüm)
  blokListesi.ekle(solÇocuk)
  blokListesi.ekle(sağÇocuk)
end for

```

Değişim aralığı kriteri:

$$r = \max f_{ij} - \min f_{ij}.$$

Varyans kriteri:

$$s^2 = \frac{1}{w_b \times h_b - 1} \left[\sum_{i=1}^{w_b} \sum_{j=1}^{h_b} f_{ij}^2 - \frac{1}{w_b \times h_b} \left(\sum_{i=1}^{w_b} \sum_{j=1}^{h_b} f_{ij} \right)^2 \right].$$

Hata kareler toplamı kriteri:

$$SSE = \sum_{i=1}^{w_b} \sum_{j=1}^{h_b} f_{ij}^2 - \frac{1}{w_b \times h_b} \left(\sum_{i=1}^{w_b} \sum_{j=1}^{h_b} f_{ij} \right)^2.$$

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi bu kriterlerden hata kareler toplamı en iyi sonuçları vermiştir. Şekil 6.2’de ise bu kriterlerin farklı malzemeler üzerinde nasıl sonuçlar verdiği görülmektedir.

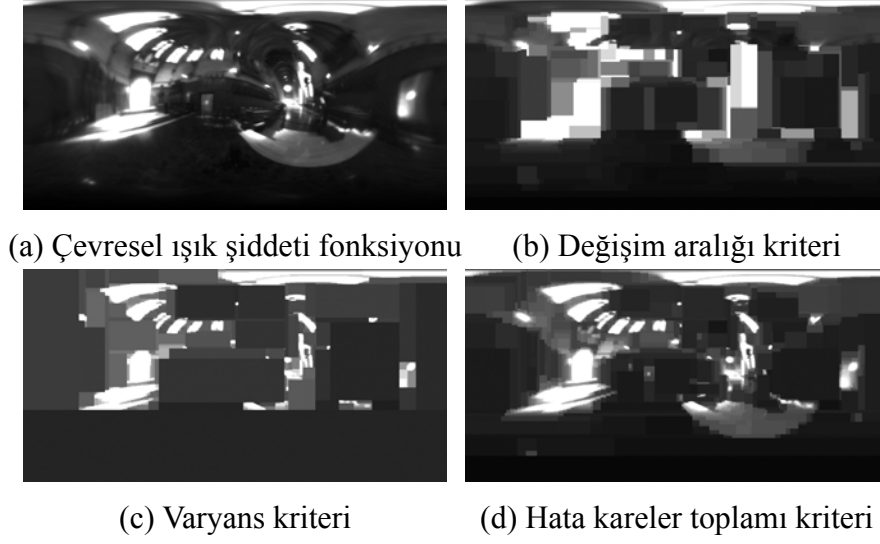
6.2.2 Ayırma düzlemi seçimi

Bir bloğu ikiye ayırırken seçilecek ayırma düzleminin, oluşacak blokların varyansını minimize etmesi gerekir. Bu amaçla her aday ayırma düzlemi için sol ve sağ olmak üzere 2 blok oluşturup bu blokların toplu varyansı hesaplanır. Toplu varyansı minimize eden ayırma düzlemi seçilir. n adet örnek k . elemandan bölündüğünde sol ve sağ blokların toplu varyansı Eşitlik 6.1’de verilmiştir.

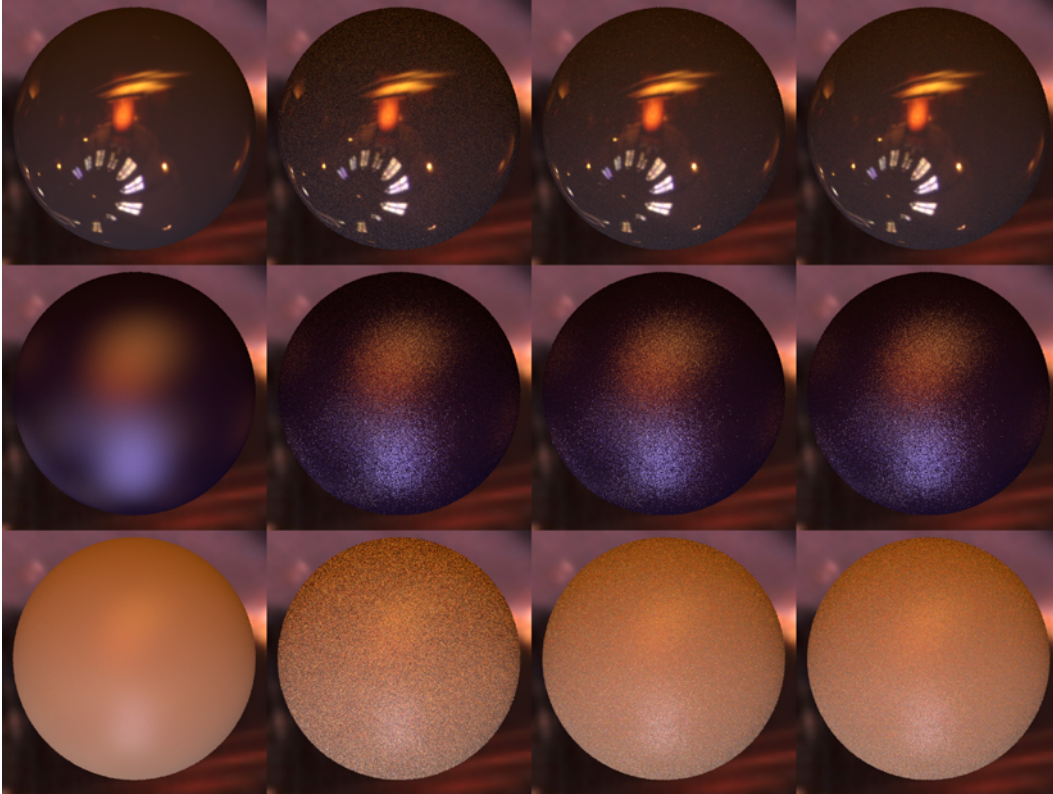
$$s_{pooled}^2 = \frac{1}{n-2} \left(\sum_{i=0}^{n-1} x_i^2 - \frac{1}{k} \left(\sum_{i=0}^{k-1} x_i \right)^2 - \frac{1}{n-k} \left(\sum_{i=k}^{n-1} x_i \right)^2 \right) \quad (6.1)$$

Karşılaştırma sırasında oluşan blokların toplam eleman sayısı ve bloktaki örneklerin kareler toplamı aynı kalacağından toplu varyansı minimize eden k değeri Eşitlik 6.2’i maksimize eden k değerine eşit olacaktır.

$$\frac{1}{k} \left(\sum_{i=0}^{k-1} x_i \right)^2 + \frac{1}{n-k} \left(\sum_{i=k}^{n-1} x_i \right)^2 \quad (6.2)$$



Şekil 6.1. Grace çevresel ışık şiddeti ve farklı kriterlere göre bölünüp tekrar oluşturulmuş ışık şiddeti fonksiyonları.



Şekil 6.2. Farklı kriterler (sırasıyla referans, değişim aralığı, varyans, hata kareler) kullanılarak sıkıştırılmış çevresel ışık altında oluşturulmuş küreler.

6.2.3 Çoklu önemine göre örnekleme desteği

Çoklu önemine göre örnekleme sırasında ışıktan ve BRDF'ten örnekler türetilerek bu örnekler için fonksiyon değerleri ağırlıklandırılır. Ağırlıklandırma sırasında

BRDF'ten üretilen örneklerin ışık dağılım fonksiyonundaki değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla verilen bir yön için olasılığın hızlı bir şekilde hesaplanabilmesi gerekir.

Önerilen kd-ağacı örnekleme yönteminde çoklu önemine göre örnekleme desteği için verilen bir yönün hangi bloğa denk geldiğinin hızlı bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Bunun için en basit yol her bloğun bu yönü içerip içermediğini test etmektir fakat bu yaklaşımın hesaplama maliyeti yüksektir. Bu amaçla hesaplama maliyeti daha düşük, ızgara kıyım (*grid hash*) yöntemi, ağaç yapısının saklanması ve olasılıkların ışık şiddet fonksiyonunda saklanması olmak üzere üç farklı yaklaşım öne sürülmüştür.

6.2.3.1 Izgara kıyım yöntemi

Izgara kıyım yönteminde iki boyutlu fonksiyon eşit aralıklı ızgara şeklinde bölünerek, ızgaranın her hücresiyle kesişen blokların listesi tutulmaktadır. Böylece istenilen yönün ızgara kıyım listesinde hangi hücreye denk geldiği hızlıca hesaplanıp sadece o hücredeki blokların istenilen yönü içerip içermediklerini test etmek yeterlidir.

Bu yöntem için ızgara aralıklarının iyi tahmin edilmesi gerekmektedir. Dar bir aralık seçildiğinde çok fazla hücre oluşacak ve saklanması gereken veri miktarı artacak, geniş bir aralık seçildiğinde de hücreye düşen blok sayısı artacak hesaplama maliyeti yükselecektir.

6.2.3.2 Ağaç yapısı

Bloklar oluşturulurken kd-ağacı yapısı kullanılmaktadır. Ağaç yapısı da blokların bilgisiyle birlikte saklanırsa, verilen bir yönün ağacın hangi bloğuna denk geldiği $O(\log n)$ zamanda hesaplanabilir.

Oluşturulan ağaç basit bir dizi üzerinde tutulmaktadır. Dizide her düğümün sol çocuğu kendisinden hemen sonra yer almaktadır (preorder traversal). Ağacın her düğümü için toplam 8 byte veri saklanmaktadır. İlk bitte düğümün yaprak olup olmadığı saklanmaktadır. Eğer yaprak düğüm ise sadece o bloğun olasılığı 32 bitlik ondalıklı sayı olarak saklanmaktadır. Eğer düğüm yaprak düğümü değilse; ilk bitten sonra gelen bitte bölme düzleminin eksenini, sonraki 11 bitte bölmenin nereden yapıldığının indeksi, sonraki 19 bitte de sağ çocuğun dizideki indeksi saklanmaktadır. Bunlara ek olarak düğümde 32 bitlik kümülatif değeri de saklanmaktadır.

Düğümleer için saklanacak verilerin bit uzunlukları sıkıştırmanın sağlanabilmesi için toplamda 64 bite sığacak şekilde tasarlanmıştır, fakat bu bazı kısıtlara neden olmaktadır. Bölme indeksinin 11 bitte tutulması bölünecek resim dosyasının çözünürlüğünün 2048×2048 'den küçük olmasını gerektirir. Sağ çocuğun indeksinin 19 bitte tutulması ise oluşturulacak toplam blok sayısını 2^{18} ile sınırlamaktadır.

Bu şekilde ağaç yapısı saklandığında verilen bir uniform ξ değişkenin CDF'deki konumunu bulmak için ağacın üzerinde gezinmek yeterlidir. Gezinme sırasında bloğun sınırları hesaplanabilir ve bu sınırlar içinde örnek türetilebilir. Aynı şekilde verilen yön değerinin hangi bloğa denk geldiği ağacın üzerinde gezilerek hesaplanabilir. Fakat çoklu önemine göre örnekleme sırasında ağacın iki defa gezilmesi gerektiği için asimtotik karmaşıklık kümlatif olasılık dağılım fonksiyonlarına dayalı önemine göre örnekleme yöntemi ile aynıdır ve pratikte bu yöntemden daha yavaş çalışmaktadır.

6.2.3.3 Işık şiddeti fonksiyonu

Çevresel ışık örnekleme yöntemi ne olursa olsun çevresel ışık şiddeti fonksiyonunun kırmızı, yeşil ve mavi olmak üzere 3 ayrı kanalda saklanması gerekmektedir. Ekran kartının desteklediği yüksek dinamik aralık (*High Dynamic Range - HDR*) doku formatlarında 4 kanal bulunmaktadır ve çevresel ışıklandırma gibi sadece 3 kanalın kullanıldığı durumlarda bile hafıza hizalamada kolaylık sağladığı için dördüncü kanal için hafıza ayrılmaktadır.

Kd-ağacı önemine göre örnekleme yöntemi ekran kartında çalışabilmek üzere tasarlanmıştır. Ekran kartında ayrılmış fakat kullanılmayan bu hafıza alanı olasılıkları saklamak amacıyla kullanılabilir. Böylece istenilen herhangi bir yön için olasılık değerleri hafıza yükü olmadan $O(1)$ zamanda tablodan okunabilir.

6.3 Örnek Türetme

Kd-ağacı ile oluşturulan bloklar seçilirken blokların ortalama değeri ile blok alanlarının çarpımı olasılık olarak kullanılır. Bu amaçla öncelikle her bloğun ortalama değeri, μ_i , hesaplanır ve daha sonra ortalama değerler ile blok alanlarının çarpımları toplamı hesaplanarak dağılım normalize edilir.

Oluşturulan bu dağılım kesikli bir dağılımdır bu sebeple blokların dağılım fonksiyonundaki yerleri değiştirilebilir. Bloklar olasılıklarına göre büyükten küçüğe sıralandığında $f(x) = \frac{1}{x+u}$ şeklinde u parametrelili analitik bir fonksiyona benze-

mehtir. Bu fonksiyon n blok için $(0, n)$ aralığında normalize edildiğinde oluşan dağılım fonksiyonu Eşitlik 6.3'te verilmiştir.

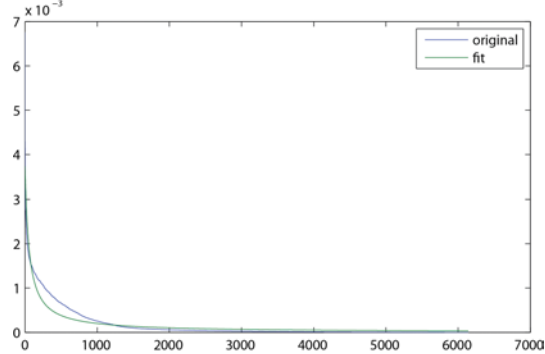
$$f(x) = \frac{1}{\log\left(1 + \frac{n}{u}\right)(u+x)} \quad (6.3)$$

Eşitlik 6.3'de verilen olasılık dağılım fonksiyonu sürekli bir fonksiyondur fakat blok seçmek için kullanılacak dağılım fonksiyonu kesikli olmalıdır. Bu sebeple sürekli dağılım, ardışık iki tamsayı değeri için kümülatif dağılım fonksiyonu farkları kullanılarak kesikli hale getirilebilir. Blok seçmek için kullanılacak dağılımın kümülatif dağılım ve kesikli olasılık dağılım fonksiyonları Eşitlik 6.4'te verilmiştir.

$$F(x) = \frac{\log\left(1 + \frac{x}{u}\right)}{\log\left(1 + \frac{n}{u}\right)}$$

$$f(x) = F(x+1) - F(x) = \frac{\log\left(1 + \frac{1}{u+x}\right)}{\log\left(1 + \frac{n}{u}\right)} \quad (6.4)$$

Olasılıklarına göre sıralanmış blok indisleri ve karşılık gelen olasılık değerleri Eşitlik 6.4'de verilen kesikli dağılım fonksiyonuna benzetilerek dağılımın parametresi olan u değeri bulunabilir. Örnek bir çevresel ışık fonksiyon için bu şekilde oturtulan bir dağılım Şekil 6.3'de görülmektedir.



Şekil 6.3. Blokların hesaplanmış olasılık değerleri ve fit edilmiş olasılık dağılım fonksiyonu.

Bu yöntemle örnek türetirken öncelikle kümülatif olasılık dağılım fonksiyonlarına dayalı önemine göre örnekleme yönteminde olduğu gibi kümülatif fonksiyonun tersi kullanılarak bir blok seçilmektedir. Kümülatif dağılım fonksiyonunun tersi Eşitlik 6.5'te verilmiştir. Seçilen bloğun indeksi de uniform dağılımdan gelen bir ξ değişkeniyle $i = \lfloor F^{-1}(\xi) \rfloor$ şeklinde hesaplanabilir. Blok seçildikten sonra ise bloğun sınırları içinde uniform yön değeri üretilmelidir. Üretilen örneğin olasılığı ise bloğun alanı ve olasılık değeri kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir.

$$F^{-1}(x) = u \left(\left(1 + \frac{n}{u}\right)^x - 1 \right) \quad (6.5)$$

Önerilen bu yöntem varyans düşüren diğer bir yöntem olan tabakalaştırma (*stratification*) ile birlikte kullanılabilir. Tabakalaştırma, oluşturulan örneklerin dağılımını bozmadan birbirinden uzaklaşmalarını sağlar. Bu koşulları sağlamak için stratifikasyonda, örneklenecek fonksiyon, tabaka (*strata*) denilen eşit olasılıklı bölümlere ayrılır ve her bölümden eşit miktarda örnek türetilir. k adet örnek üretmek için $(0, 1)$ aralığı k eşit parçaya bölünür ve her aralıktan uniform bir örnek türetilir. Bu uniform örnekler kümülatif dağılımın tersine verildiğinde stratifikasyon işlemi sağlanmış olur. Blok seçme sırasında kullanılan dağılım analitik olarak ifade edildiğinden tabakalaştırma kolaylıkla sağlanabilir.

7. GÖRÜNÜRLÜK TESTLERİ

Görünürlük testleri, sahnedeki farklı iki noktanın birbirini görüp görmediğini gösteren fonksiyonlardır. Bu fonksiyonlar görüntü oluşturma denkleminin alansal formunda görülmektedir ve oluşturulan görüntünün fiziksel gerçekliğini önemli derecede etkiler.

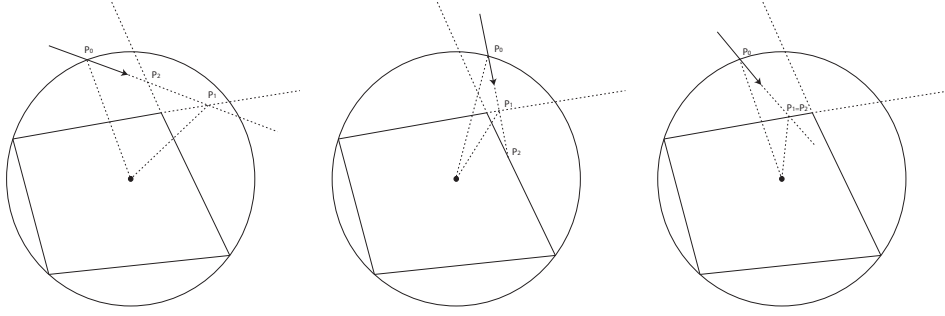
Doğrudan ışıklandırma için yapılan görünürlük testleri tek bir noktadan farklı yönlerde yapıldıkları için GPU donanımında gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilebilir. Fakat, dolaylı ışıklandırma için yapılan görünürlük testleri herhangi iki nokta arasında olabilir. Literatürde bu tür görünürlük testleri bu amaçla geliştirilmiş uzaysal veri yapıları kullanarak hızlandırılmış ışın izleme yöntemleri ile yapılmaktadır, fakat bu yapıların oluşturulmasının ve güncellenmesinin maliyeti yüksek olması nedeniyle gerçek zamanlı dinamik sahneler için elverişli değildir. Bu nedenle tez kapsamında, gerçek zamanlı dinamik sahnelerde kullanılabilecek bir görünürlük testi yöntemi öne sürülmüştür.

Gerçek zamanlı dolaylı ışıklandırma yöntemlerinde en çok zaman harcanan kısım görünürlük testleridir (Novák and Dachsbacher, 2012). Literatürde gerçek zamanlı dolaylı ışıklandırma için önerilen yöntemlerden bazıları görünürlük testlerini yok sayarken (Dachsbacher and Stamminger, 2005), bazıları da görüntü oluşturma denklemi üzerinde oynamalar yaparak bu testlerden kaçınmışlardır (Dong et al., 2007; Dachsbacher et al., 2007). Novák and Dachsbacher (2012)'in öne sürdüğü görünürlük testi algoritmasında ise sahne için bir Kapsayan Hacim Hiyerarşisi (*Bounding Volume Hierarchy - BVH*) oluşturulmaktadır. BVH'in oluşturulması sırasında, öncelikle yükseklik haritası (*height map*) olarak ifade edilebilecek alt dallar tespit edilir. Daha sonra bu alt dallar için BVH ağacı oluşturulur. Görünürlük testi sırasında ise geleneksel ışık-üçgen kesişim testi yerine yükseklik haritalarında kullanılabilecek daha basit bir kesişim testi olan ışın yürütme (*ray marching*) yöntemi kullanılmaktadır.

7.1 Dışbükey Kesişim Testi

Tez kapsamında öne sürülen görünürlük testi algoritmasında Novák and Dachsbacher (2012)'in çalışmasına benzer bir yaklaşım uygulanmaktadır. Bu çalışmada önerildiği gibi sahne için bir BVH ağacı oluşturulmaktadır, fakat ağacın son düğümlerinde yükseklik haritası yerine sahnedeki objelerin dışbükey parçalarını temsil edecek küresel düzlem haritaları kullanılmaktadır. Bu haritalar aracılığıyla ışın kesişimi ortalama 2.1 iterasyonda kesin sonuca ulaşmaktadır.

Öne sürülen yöntemin ön hesaplama aşamasında öncelikle, sahnede kullanılacak nesnelere dışbükey parçalara bölünmelidir. Daha sonra her dışbükey parçanın küresel düzlem haritası oluşturulmalıdır. Küresel düzlem haritası oluşturulurken θ ve ϕ açıları ile parametrize edilmiş her yön için dışbükey objenin merkezinden bir ışın fırlatılır. Bu ışın dışbükey objeyi mutlaka tek bir noktada kesmelidir. Işının dışbükey objeyi kestiği noktadaki düzlemin denklemi küresel düzlem haritası olarak adlandırılan 2 boyutlu dokularda saklanır.



Şekil 7.1. Kesişim testi sırasında karşılaşılabilecek durumlar.

Tez çalışmasında öne sürülen bu yöntemin görünürlük testi sırasında ise, sahneyi oluşturan objeleri temsil eden dışbükey nesnelere için BVH ağacı hazırlanır. BVH ağacının her yaprağında bir dışbükey nesne bulunmaktadır. BVH üzerinde ışın ile kesişim testi yapılırken, yaprak düğümlerden birine ulaşıldığında, ışının bu küreyi kestiği nokta hesaplanır. Daha sonra bu nokta üzerinden başlayarak dışbükey kesişim testi uygulanır. Bu testte başlangıç noktasının küresel koordinatları kullanılarak kürenin merkezinden bu yöne doğru olan ışının dışbükey nesneyi kestiği düzlemin denklemi küresel düzlem haritasından okunur. Test ettiğimiz nesne dışbükey olduğu için ışının bu düzlemi kestiği nokta ya dışbükey nesnenin üzerindedir ya da dışarıdadır. Ayrıca aradığımız kesişim noktasının bu düzlemin ön tarafında olması imkansızdır. Aranılan nokta ya bu düzlem üzerinde olacak ya da arkasında kalacaktır. Kesişim testine ışının bu düzlemi kestiği noktadan devam edilir. Bu noktadaki düzlem için de aynı kesişim noktasının bulunması son iki kesişim testinin aynı düzlemle yapılmış olduğunu yani dışbükey nesne üzerindeki aranılan kesişim noktasına ulaşıldığını gösterir. Son Düzlem \times Işın kesişim testinde bulunan noktanın ışın üzerinde bir önceki noktaya göre daha geride olması ise ışının dışbükey nesneyi kesmeden küre dışına çıktığını gösterir. Son kesişim testinde bulunan nokta ışın üzerinde bir öncekine göre daha ilerideyse test edilmesi gereken farklı bir düzleme ulaşılmıştır ve bu noktadan kesişim testleri devam etmelidir. Şekil 7.1’de bu durumlar gösterilmiştir. Şekilde solda kesişimin olmadığını gösteren durum; ortada testin, bulunan son kesişim noktasından devam etmesi gerektiğini gösteren durum; sağda ise kesişimin olduğunu gösteren durum görülmektedir. Düzlem \times Işın ke-

sişiminde hesaplanan nokta; bir önceki noktadan gerideyse ışının dışbükey objeyi kesmesi imkansızdır, bir önceki noktadan ilerdeyse bu noktadan kesişim testine devam edilmelidir, bu nokta ile aynı konumdaysa da kesişim noktasına ulaşılmıştır. Öne sürülen bu kesişim testi Algoritma 3’de özetlenmiştir.

Algoritma 3 $t \leftarrow$ görünürlükTesti(*Işın*, *Küre*, *DüzlemHaritası*)

```

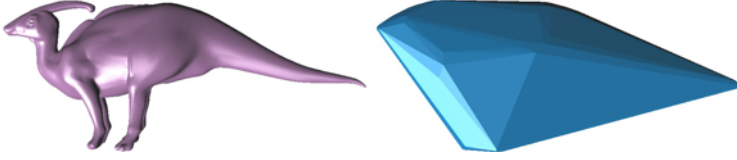
if Işın ile Küre kesişmiyor then                                ▷ Kesişim yok
    return  $\infty$ 
end if
 $t_1 \leftarrow$  Işın  $\times$  Küre kesişim noktasının Işın üzerindeki konumu
 $P_1 \leftarrow$  Işın.Merkez +  $t_1$  Işın.Yön
loop
     $t_0 \leftarrow t_1, P_0 \leftarrow P_1$ 
    Düzlem  $\leftarrow$  DüzlemHaritası( $P_0$ )
    if Işın ile Düzlem kesişmiyor then                            ▷ Kesişim yok
        return  $\infty$ 
    end if
     $t_1 \leftarrow$  Işın  $\times$  Düzlem kesişim noktasının Işın üzerindeki konumu
     $P_1 \leftarrow$  Işın.Merkez +  $t_1$  Işın.Yön
    if  $P_1$  noktası Küre dışında kalıyor ya da  $t_1 < t_0 - \epsilon$  then    ▷ Kesişim yok
        return  $\infty$ 
    end if
    if  $t_1 - t_0 < \epsilon$  then                                        ▷ Kesişim var
        return  $t_0$ 
    end if
end loop

```

7.1.1 Dışbükey ayrıştırma yöntemleri

Kesişim testleri, video oyunları ve bilgisayar animasyonlarında gerçekçi fiziksel etkileşimler için önemli rol oynar. Fizik simülasyonlarında kullanılan kesişim testleri ışıklandırma sırasında da kullanılabilir. Fakat, genellikle bu simülasyonlardaki kesişim testlerinde gerçek zamanlı etkileşimi sağlamak amacıyla sahnedeki nesnelere (örneğin animasyon karakterleri, statik nesnelere) yerine önceden tahmin edilen elipsoidler, kapsüller ve dışbükey kabuklar gibi basit dışbükey geometriler kümesi kullanılmaktadır. Uygulamada, bu basit şekiller hızlandırma sağlasa da Şekil 7.2’de görüldüğü gibi içbükey yüzeyler için yetersiz yaklaşımlara ve yanlış kesişim sonuçlarına neden olmaktadır. Bu nedenle dışbükey kabuk kesişim testleri için yetersiz kalmaktadır.

İkinci bir yaklaşım ise bir S yüzeyini en az sayıda dışbükey parçadan oluşacak şekilde kümelere ayırmaktır. Tam bir ayrıştırma yapan bu yöntemlerin NP-hard olduğu Chazelle et al. (1995) tarafından ispatlanmıştır. Ayrıca tam bir ayrıştırma sonucu oluşan kümelerin sayısı Şekil 7.3’de görüldüğü gibi çok fazladır. Bu sınır-



Şekil 7.2. Soldaki geometri için hesaplanan dışbükey kabuk sağda görülmektedir.

lamaları aşmak amacıyla tam bir ayrıştırma yapmak yerine yaklaşık bir ayrıştırma yapılabilir. Buradaki hedef kullanıcı tarafından tanımlanmış bir eşik değerinden düşük içbükeylik ölçüsüne sahip kümeler oluşturup, küme sayısını ve hesaplama maliyetini azaltmaktır.

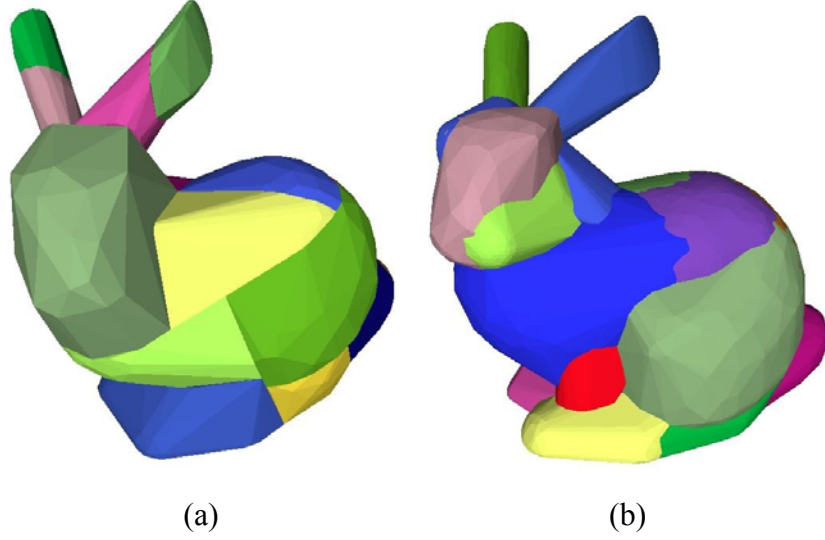


Şekil 7.3. Tam bir dışbükey ayrıştırma örneği.

7.1.2 Literatürdeki dışbükey ayrıştırma algoritmaları

Yaklaşık dışbükey ayrıştırma amacıyla öne sürülmüş yöntemlerden biri olan yaklaşık dışbükey ayrıştırma (*Approximate Convex Decomposition - ACD*)'dir (Lien and Amato, 2007, 2008). Bu yöntemde oluşan her alt kümenin içbükeylik ölçüsü önceden belirlenen bir eşik değerinden düşük olana kadar geometrinin iteratif olarak bölünmesinden oluşan bir böl-ve-yönet stratejisi uygulanmıştır. Bu yöntemin her aşamasında en yüksek içbükeylik ölçüsüne sahip olan köşe seçilir. Köşeyi içeren küme, bu köşeden geçen bir bölme düzlemi ile iki alt kümeye ayrılır. Bu yaklaşımın temel sınırı geometri özelliklerinin karmaşık analizini gerektiren en iyi bölme düzleminin seçilmesi ile ilgilidir (Lien and Amato, 2007, 2008). Ayrıca kümelelerin ayrılması sırasında sadece düzlemlerin dikkate alınması Şekil 7.4a'da görüldüğü gibi düşük kalitede ayrışımlara yol açabilir.

hiyerarşik yaklaşık dışbükey ayrıştırma (*Hierarchical Approximate Convex Decomposition - HACD*) algoritması (Mamou and Ghorbel, 2009) geometrinin üçgenlerini içbükeylik ölçüsünü azaltacak şekilde kümelerken aşağıdan yukarıya doğru bir yaklaşım uygular. Yöntemde öncelikle geometrinin eşlenik çizgesi (*dual graph*)



Şekil 7.4. (a) ACD ve (b) HACD yöntemi kullanılarak oluşturulan dışbükey ayrışımı.

oluşturulur. Çizgenin her köşesi geometrinin üçgenlerini, her kenarı da üçgenlerin komşuluğunu göstermektedir. Daha sonra bu çizgenin köşeleri topolojik seyreltme işlemleri uygulanarak kümelenir. Bu işlem sırasında kümelerin içbükeylik ölçülerini ve en boy oranlarını dikkate alan bir maliyet fonksiyonunun en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Şekil 7.4b’de bu yöntem ile oluşturulmuş bir dışbükey ayrışım görülmektedir.

hızlı yaklaşık dışbükey ayrıştırma (*Fast Approximate Convex Decomposition - FACD*) algoritması (Ghosh et al., 2013) ACD algoritmasını iyileştirmeye yönelik bir çalışmadır. ACD algoritmasındaki mutlak içbükeylik ölçüsü yerine yeni bağlı bir ölçü kullanılmıştır. Ayrıca her aşamada kümeler iki alt küme yerine dinamik programlama kullanılarak seçilen $n - 1$ düzlem ile n alt kümeye bölünebilmektedir.

7.1.3 Hiyerarşik yaklaşık dışbükey ayrıştırma algoritması (HACD)

Tez kapsamında geliştirilen görünürlük testlerinde kullanılmak üzere, uygulama kolaylığı ve oluşturulan ayrıştırmaların kalitesi dikkate alındığında HACD algoritmasının uygun olduğu görülmüştür ve bu algoritmayı kullanarak dışbükey ayrıştırması yapan bir araç geliştirilmiştir. Bu araçta kullanılan parametrelerin açıklaması aşağıda açıklanmıştır. Ayrıca Princeton Shape Benchmark veritabanından (Shilane P., 2004) gelişigüzel seçilmiş geometrilerin dışbükey ayrıştırması gerçekleştirilmiş ve sonuçları verilmiştir.

7.1.4 HACD parametreleri

Küme Sayısı Oluşturulacak kümelerin minimum adedini belirler.

Dışbükeylik Oluşturulacak her küme için izin verilen maksimum içbükeylik ölçüsünü belirler.

Birleşme Uzaklığı Birden fazla bağlı bileşen (*connected component*) içeren geometriler için, birbirine bu değerden yakın olan iki bileşenin birleştirilmesi için kullanılır.

Parçalanmış Üçgen Sayısı Hesaplama zamanını düşürmek amacıyla geometrilerin basitleştirilmesine olanak sağlar. Basitleştirilen geometride hedeflenen üçgen sayısını belirler.

Dışbükey köşe sayısı Dışbükey kabukların içerebileceği maksimum köşe sayısını belirler. Köşe sayısı bu değeri aşıyorsa dışbükey kabuk daha küçük parçalara ayrılır.

Kümeleme Eşik Değeri Kümenin küçük kabul edileceği yüzey alanını belirler (tüm yüzey alanının yüzdesi olarak ifade edilir) ve bu alandan küçük kümeler yüksek bir içbükeylik ölçüsüne neden olsalar bile diğer kümeler ile birleşmesi için zorlanır.

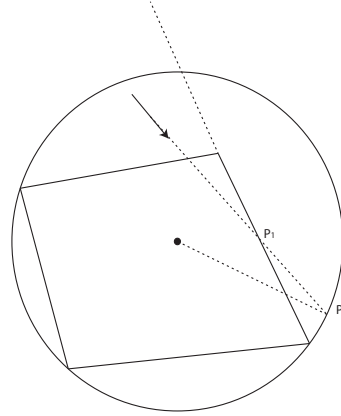
Ek Uzaklık Noktaları Eğer seçilmişse, yüksek içbükeylik ölçüsüne sahip geometrilerde kümelerin içbükeylik ölçüsü hesaplanırken sadece o kümeye ait ışınların değil, içbükeyliğe neden olacak ek ışınların da dikkate alınmasını sağlar.

Yüzey Noktaları Eğer seçilmişse içbükeylik ölçüsü hesaplanırken üçgen merkezlerine yerleştirilen ekstra ışınlar da dikkate alınır. Az sayıda üçgen içeren geometrilerin içbükeylik ölçüsünün daha hassas hesaplanabilmesini sağlar.

7.1.5 Sıradışı durumlar

Görünürlük testi sırasında ışının başlangıç noktası kürenin içerisinde kalıyorsa kesişim testi hatalı olabilmektedir. Şekil 7.5'te de görüldüğü gibi ışının küreyi ilk kestiği noktadan düzlem haritası bilgisi alınırsa bu düzlem ile ışının kesiştiği noktanın; ışının küre ile kesiştiği noktadan daha geride olduğu görülmektedir. Bu durumda algoritma hatalı olarak kesişim yok sonucunu üretecektir. Bu hatayı düzeltmek için ışının küreyi kestiği ilk nokta hesaplanırken ışının başlangıç noktasından geride olan kesişimler de dikkate alınmaktadır. Fakat bu değişiklik ışının başlangıç noktasından önce görülen kesişimlerin de sonuç olarak döndürülmesine neden olmaktadır. Bu

nedenle olası bir sonuç bulunduğunda kesişim noktasının başlangıç noktasından geride olup olmadığı da kontrol edilmelidir.

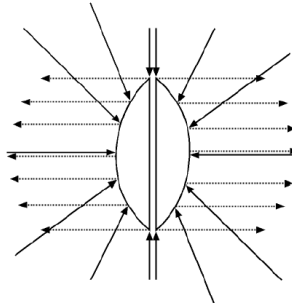


Şekil 7.5. Kesim testi sırasında karşılaşılan hatalı durum.

7.1.6 İyileştirmeler

Düzlem haritalarının oluşturulması sırasında küresel parametrizasyonun kullanılması elverişli değildir. Küresel koordinatlar hesaplanırken arkkosinüs ve arkatanjant gibi karmaşık trigonometrik fonksiyonlar kullanılmaktadır. Tez kapsamında geliştirilen yöntem için çalışma zamanı önemli bir kriter olduğundan küresel parametrizasyon yerine hesaplanması daha kolay olan ikili parabolit parametrizasyonu (Heidrich and Seidel, 1998) kullanılmıştır.

Üç boyutlu bir sahne; içerisindeki belirli bir P noktası üzerinden ön ve arka olmak üzere iki yarıküreye bölünebilir. Şekil 7.6'da da görüldüğü gibi her bir yarıküre için sahnedeki P noktasına doğru gelen herhangi bir ışını yarıküre yönünde yansıta- cık bir parabolit yüzey bulunur. İkili parabolit parametrizasyon bu yansıma vektörlerini koordinatların hesaplanması sırasında kullanılmaktadır. Yansıma vektörleri, her yarıküre için 2 boyutlu bir düzlem üzerine düşürülerek koordinatlar hesaplanır.



Şekil 7.6. İkili parabolit parametrizasyon için kullanılan yansıma vektörleri.

İkili parabolit parametrizasyonda parabolitler için parametrik yüzey nor-

malleri yüzeye tanjant iki vektörün dışsal çarpımlarından hesaplanabilir:

$$\begin{aligned}
 f(s, t) &= \frac{1}{2} - \frac{s^2 + t^2}{2} \\
 \mathbf{P} &= (s, t, f(s, t)) \\
 \mathbf{T}_s &= \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial s} = \left(1, 0, \frac{\partial f(s, t)}{\partial s} \right) = (1, 0, -s) \\
 \mathbf{T}_t &= \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} = \left(0, 1, \frac{\partial f(s, t)}{\partial t} \right) = (0, 1, -t) \\
 \mathbf{N} &= \mathbf{T}_s \times \mathbf{T}_t = (s, t, 1)
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

Ayrıca her paraboloid için yansıma vektörü bilinmektedir. Gelen ışının yönü, \mathbf{D} , de bilindiğine göre bu iki vektörün toplamından yansıma noktasındaki normal hesaplanabilir. Hesaplamalar sırasıyla üst ve altyarıküre için:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{N} &= \frac{D + (0, 0, 1)}{D_z + 1} & \mathbf{N} &= \frac{D + (0, 0, -1)}{D_z - 1} \\
 (s, t, 1) &= \left(\frac{D_x}{1 + D_z}, \frac{D_y}{1 + D_z}, 1 \right) & (s, t, 1) &= \left(\frac{D_x}{1 - D_z}, \frac{D_y}{1 - D_z}, 1 \right)
 \end{aligned}$$

Geri dönüşümler ise sırasıyla:

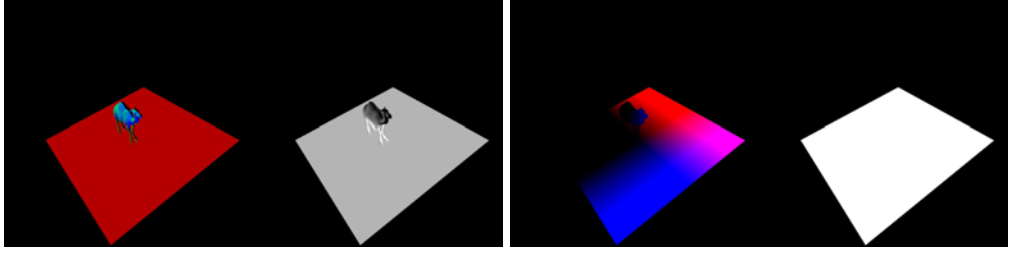
$$\begin{aligned}
 u &= s^2 + t^2 & u &= s^2 + t^2 \\
 \mathbf{D} &= \left(\frac{2s}{1 + u}, \frac{2t}{1 + u}, \frac{1 - u}{1 + u} \right) & \mathbf{D} &= \left(\frac{2s}{1 + u}, \frac{2t}{1 + u}, \frac{u - 1}{1 + u} \right)
 \end{aligned}$$

şeklinde olmaktadır.

7.2 Işım İzleme Algoritması

Tez kapsamında öncelikle çevresel ışık ile ışıklandırılmış bir sahnenin sadece doğrudan ışıklandırılması dikkate alınarak ekran kartında betimlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla öncelikle çevresel ışıkların önemine göre örneklenmesi için bir algoritma; ve daha sonra da dolaylı yansımalarda kullanılacak bir görünürlük testi algoritması öne sürülmüştür.

Geliştirilen uygulamada öncelikle kamera tarafından görünen her noktanın konum, tanjant uzayı ve malzeme bilgileri Şekil 7.7'de görüldüğü gibi 2 boyutlu dokularda saklanmaktadır. Bu görüntüler görüntü oluşturma denkleminde ihtiyaç duyulacak bütün bilgileri içermektedir. Oluşturulacak görüntünün her pikseli için o pikselden görünen nesnenin konumu, malzeme bilgisi ve tanjant uzayı kullanılarak her pikselde monte carlo integrasyonu yapılmaktadır.



Şekil 7.7. Kameradan görünen bilgiler: Soldaki iki görüntü quaternion olarak saklanmış tanjant uzayı dönüşümünü göstermektedir. Sağdaki iki görüntü de her noktanın konumunu ve malzeme bilgilerini kodlamaktadır.

Bu görünürlük testi algoritması yaklaşık bir algoritma olsa da ekran kartında hızlı bir şekilde çalışmak için tasarlanmıştır. Gerçekleştirilebilmesi için ışın izleme yöntemini hızlandıran uzaysal sahne hiyerarşilerine ihtiyaç duyulmuştur.

Işın izleme algoritması öncelikle NVIDIA'nın genel amaçlı grafik işlem ünitesi programlamaya yönelik bir kütüphanesi olan hesaplama bütünleşik cihaz mimarisi (*Compute Unified Device Architecture - CUDA*) (NVIDIA, 2012) üzerinde gerçekleştirilmiş, performansı yeterli bulunmadığından daha sonra yine NVIDIA'nın ışın izleme algoritmalarını CUDA kullanarak geliştirdiği kütüphanesi OptiX (NVIDIA, 2013) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

7.2.1 CUDA uygulaması

CUDA üzerinde geliştirilmiş slash-sandbox (Pantaleoni, 2013) kütüphanesinde, (Garanzha et al., 2011)'da öne sürülen BVH ağacı üretme algoritmasının uygulaması bulunmaktadır. Tez kapsamında öncelikle bu kütüphanenin çalışması ve kütüphane tarafından üretilen sahne hiyerarşilerinin ışın kesişim sırasında nasıl gezilmesi gerektiği incelenmiştir. CUDA ile geliştirilen uygulamada bu kütüphane kullanılarak sahne hiyerarşisi oluşturulmuştur. Kameradan görünen her piksel için ise örnek gelen ışık yönleri türetilerek, bu ışınlar için görünürlük testi CUDA ortamında yapılmaktadır.

Geliştirilen uygulamanın yeterli performansa ulaşamadığı görülmüştür. Bunun nedeni, uygulamada kullanılan kütüphanelerin grafik kartı iş parçacıkları arasında yük dengeleme uygulamaması olduğu görülmüştür. Bu işlem karmaşık bir işlem olduğundan, bu işlemi arka planda gerçekleştiren OptiX kütüphanesinin kullanılması uygun görülmüştür.

7.2.2 OptiX Uygulaması

OptiX, ışın izleme uygulamalarını hızlandırmak amacıyla NVIDIA tarafından geliştirilmiş bir kütüphanedir. İşlemcilerde dakikalar süren ışın izleme uygulamaları, OptiX aracılığıyla milisaniyeler içinde tamamlanmaktadır. OptiX sahne hiyerarşisini ekran kartının paralel gücünü kullanarak oluşturur. Ayrıca oluşturulacak görüntüleri küçük parçalara bölerek, her parçayı paralel bir şekilde ekran kartında oluşturur. Görüntünün bölünmesi sırasında yük dengeleme stratejisi uygular. Bu işlemler sırasında kullanılan ışınların oluşturulması, geometrilerin kesişim testleri ve malzemelerinin özelleştirilebildiği bir ortam sunar.

Tez kapsamında geliştirilen çevresel ışık altındaki sahnelerin doğrudan ışıklandırılmasının hesaplandığı uygulamada OptiX kütüphanesi kullanılmıştır. Işınların oluşturulması ve geometri kesişim testleri için OptiX kütüphanesine eklentiler geliştirilmiştir.

İlk olarak, her piksel için o noktadan görünen nesnenin konumu, tanjant uzayı ve malzeme bilgileri pikselleştirme (*rasterization*) ile hesaplanır. Bu bilgilere ek olarak çevresel ışık örnekleme fonksiyonu da kullanılarak kamera tarafından görünen her piksel için hem BRDF'ten hem de ışıktan örnek ışın yönleri türetilir. Bu ışınlar OptiX aracılığı ile sadece görünürlük testi amacıyla izlenmektedir. Bu yönde herhangi bir geometri bulunuyorsa gelen ışık geometri tarafından engellenir ve Monte Carlo tümlerisinde etkisi olmaz.

Oluşturulan her görüntüde her piksel için sadece birer örnek türetilmektedir. Sahnede herhangi bir değişiklik yok ise Monte Carlo integrasyonunda daha önce türetilen örnekler ile birlikte kullanılarak kalite yükseltilir. Bu nedenle sahne ya da bakış açısının değiştiği durumlarda Monte Carlo integrasyonuna yeniden başlandıktan, hareket esnasında gürültü oluşmaktadır.

OptiX olası her ışın geometri kesişiminde kullanıcının tanımladığı bir fonksiyon çağırır. Bu fonksiyon gelen ışının geometriyi kesip kesmediğini obje uzayında test eder. Eğer bir kesişim bulunuyorsa kesişim noktasını döndürür.

Işının kesiştiği her noktada ışın izlemeye devam edip edilmeyeceğini belirten bir fonksiyon çağırılmaktadır. Herhangi bir kesişim bulunduğu 0 değerini döndürüp ışın izlemesi sonlandırılır, ışın hiçbir nesneyi kesmiyorsa 1 değerini döndürür.

8. BRDF'İN KÜRESEL NORMAL DAĞILIMLARLA MODELLENMESİ

Işıklandırma integralinin sayısal tahmini, yakınsamanın bir sonucu olarak hatalar üretebilir. Bu hataları azaltmak için, çoklu önemine göre örnekleme (Veach, 1998) gibi birçok gürültü azaltma teknikleri önerilmiştir. Diğer taraftan, çevresel ışığın filtrelenmesiyle sayısal tahminleme yöntemleri ihmal edilebilir. İzotropik BRDF modelleri radyal simetrik olduğundan, çevresel ışık kolayca sadece bakış yönü ve malzemenin parlaklığını belirten bir parametre kullanarak filtre edilebilir. Ancak anizotropik malzemeler için yansımanın oryantasyonunu da dikkate almak gerekir. Fakat anizotropik BRDF'lerin modellenmesinde, radyal simetrik olan Küresel Normal Dağılım (*Spherical Gaussian - SG*)'ların karışımları doğru bir yaklaşım sağlayabilir.

SG'ler kullanılarak, küresel fonksiyonların modellenmesi çevresel ışıklandırma altında yansımaların gerçek zamanlı hesaplanmasında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Yakın zamanda öne sürülmüş birçok yöntem (Tsai and Shih, 2006; Wang et al., 2009; Xu et al., 2013) BRDF, ışıklandırma ve görünürlük tahminleme amacıyla SGs'leri kullanmışlardır.

BRDF verisinin SG karışımları kullanılarak ifade edilmesi ve bu modelin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımı incelenmiştir. Bu amaçla 2 farklı yöntem öne sürülmüştür. Yöntemlerden ilkinin ön hesaplama maliyeti yüksek iken, gerçek zamanlı uygulama maliyeti son derece düşüktür. Bu nedenle mobil uygulamalarda kullanım için elverişlidir. Diğer yöntem ise herhangi bir ön hesaplama içermediğinden dinamik sahnelerde kullanılabilir.

Literatürde benzer yöntemler (Tsai and Shih, 2006; Wang et al., 2009; Xu et al., 2013; Iwasaki et al., 2012) öne sürülmüş olsa da, öne sürülen her iki yöntemde de çevresel ışıklandırmanın filtrelenmesi için herhangi bir ön işlem yapılmamaktadır. Bu nedenle dinamik ışıklandırılan sahnelerde kullanılabilir.

Bu bölümde öncelikle bu alanda yapılan çalışmalara yer verilecek daha sonra, SG ve Beklenen Değer Maksimizasyonu (*Expectation-Maximization - EM*) hakkında bilgi verilecektir. Son olarak da öne sürülen iki yöntem açıklanıp sonuçlar sunulacaktır.

8.1 Literatür Özeti

Öne sürülen yöntemlere benzer olarak literatürde ışıklandırma amacıyla SG kullanan yöntemler (Green et al., 2006, 2007; Wang et al., 2009; Xu et al., 2013) bulunmaktadır. Green et al. (2006) önceden hesaplanmış radyans transferi yöntemlerinde ortogonal baz vektörlerinin doğrusal bileşimi yerine küresel dağılımların karışımlarını kullanarak doğrusallığı ortadan kaldırmışlardır. Parlak yüzeyler için yüksek kalitede sonuç vermesine rağmen, yöntem statik sahnelerle sınırlıdır. Green et al. öne sürdükleri bu yöntemi, ışıklandırma ve görünürlük bilgisini birbirinden ayırarak iyileştirmişlerdir. (Green et al., 2007). Bu yöntemde görünürlük bilgisini küresel harmonikler, ışık bilgisini ise küresel normal dağılımların karışımlarını kullanarak modellemişlerdir. Green et al.'ın önerdiği her iki yöntem (Green et al., 2006, 2007) de anizotropik malzemeleri desteklememektedir.

Wang et al. (2009), ışıklandırma amacıyla yarımaçı vektörü uzayında tanımlı küresel normal dağılım karışımlarını kullanmışlardır. Bu karışımların parametrelerinin tahmin edilmesi sırasında, analitik BRDF modelleri için modellerin parametrelerine bağlı analitik fonksiyonlar öne sürmüşlerdir. Anizotropik ve ölçülmüş BRDF verileri için ise parametreleri L-BFGS-B (Zhu et al., 1997) çözücüsü kullanılarak tahmin etmişlerdir. Işıklandırma sırasında yarı-açı vektörü uzayında tanımlı küresel dağılımlar, önerdikleri yöntem ile bakış açısına göre eğilerek, ışık uzayına taşınmaktadır. Daha sonra çevresel ışık dokusundan ışık şiddeti örneklemek amacıyla ışık uzayına taşınmış bu SG'ler kullanılmaktadır. Bu eğme işlemi sırasında yapılan yakınsamalar, özellikle sınır açılarda hatalara neden olmaktadır.

Xu et al. (2013) önerdikleri yöntemde radyal simetrik küresel dağılımlar yerine, eliptik dağılımlar kullanarak, anizotropik malzemelerde ihtiyaç duyulan dağılım sayısını en aza indirmektedir.

Colbert ve Krivanek'in öne sürdüğü filtrelenmiş önemine göre örnekleme yönteminde (Colbert and Krivanek, 2007), öncelikle BRDF'ten ışık yönleri örneklenmektedir. Daha sonra, ön-filtrelenmiş çevresel ışık dokularından örneklerin olasılıklarına göre uygun olanı seçilip, örnek yönündeki filtrelenmiş ışık şiddeti değeri okunmaktadır. Bu işlem, görüntü piramidi (*mip-mapping*) tekniği kullanılarak ekran kartı donanımında hızlı olarak gerçekleştirilebilmektedir. Yöntem, yeterli kaliteye ulaşmak için yüksek sayıda örneğe ihtiyaç duymaktadır ve yüksek anizotropiklik oranına sahip malzemelerde hatalı sonuçlar üretmektedir.

Kautz et al. (2000), anizotropik malzemeler için gereken 5 parametreyi (3 pa-

rametre oryantasyon bilgisi için ve 2 parametre de bakış açısı için) Banks BRDF modelini (Banks, 1994) kullanarak bir takım varsayımlar yaparak, üçe indirmişlerdir. Böylece, verilen bir çevresel ışık için filtreleme önceden hesaplanabilir hale gelmiştir. Fakat, Banks modelinin kısıtları ve yapılan varsayımların getirdiği hatalar, görüntü kalitesini olumsuz etkilemektedir.

Tan et al. (2005) küresel normal dağılımların karışımlarını, yansımaların çözünürlüğe göre filtrelenmesi için kullanmışlardır. Bu yöntemde parametrelerin tahmini için EM algoritması kullanmışlardır. Fakat, komşu küresel normal dağılım karışımlarını doğrusal interpolasyonda kullanabilmek için EM algoritmasında bazı değişiklikler uygulamışlardır.

Ayrıca, Han et al. (2007) küresel normal dağılım karışımlarını kullanarak normal haritası filtreleme üzerine bir yöntem öne sürmüştür.

8.2 Küresel Normal Dağılımlar, Spherical Gaussians (SG)

Von Mises-Fisher dağılımı (Han et al., 2007), \mathbb{R}^p 'de $(p - 1)$ boyutlu küre üzerinde tanımlı yönsel dağılımlardır. $p = 3$ için olasılık dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \kappa) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh \kappa} e^{\kappa \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{x}} \quad (8.1)$$

Yüksek κ değerleri için, $\sinh \kappa \approx \frac{e^\kappa}{2}$ yaklaşımı kullanılabilir. Pratikte, $\kappa > 2$ için bu yaklaşım doğru sonuçlar verir. Bu durumda olasılık dağılım fonksiyonu:

$$g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \kappa) \cong \frac{\kappa}{2\pi} e^{-\kappa(1 - \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{x})} \quad (8.2)$$

şeklinde yazılabilir.

\mathbf{x} ile $\boldsymbol{\mu}$ arasındaki açıya β denirse, eksponensiyelin 0'dan farklı bir sayı olması için β değerinin küçük olması gerekir. Bu durumda $1 - \cos \beta \cong \beta^2/2$ yaklaşımı kullanılarak olasılık dağılım fonksiyonu normal dağılım formuna getirilebilir:

$$g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \kappa) \cong \frac{\kappa}{2\pi} e^{-\frac{\kappa}{2}\beta^2} \quad (8.3)$$

Özetle 3 boyutta Von Mises-Fischer dağılımları küre üzerinde normal dağılımın özelliklerini gösterir.

Küresel normal dağılımlar, ya da von Mises-Fischer dağılımları, $\boldsymbol{\mu}$ parametresiyle belirlenmiş bir eksen çevresinde simetriktir. Dağılımın şeklini ise κ paramet-

resi belirler. Bu dağılımların birtakım özellikleri görüntü oluşturmada kullanılmaları için elverişlidir. Bu özelliklerden en belirgin olanı küresel rotasyonunun kolay bir şekilde hesaplanabilir olmasıdır. Küresel normal dağılımlar, eksenleri etrafında radyal simetrik olduğundan, küresel rotasyonları sadece eksenin küresel rotasyonu ile tanımlanır.

8.3 Küresel Normal Dağılımı Karışımları ve Parametre Tahmini

Küre üzerinde tanımlı herhangi bir dağılım, küresel normal dağılımların ağırlıklı ortalaması şeklinde modellenebilir:

$$f(\mathbf{x}) \cong \sum_{k=1}^N \alpha_k g(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}_k, \kappa_k) \quad (8.4)$$

Bu tür dağılımlar Gauss karışım modeli (*Gaussian Mixture Model - GMM*) olarak adlandırılır.

İstatistiksel bir modelin parametreleri, en çok benzerlik (*maximum likelihood*) yöntemi ile tahmin edilebilir. Fakat, Eşitlik 8.4'deki gibi bir karışımın içerdiği toplam sembolü nedeniyle, kapalı bir formu mümkün değildir. Bu yüzden parametreler nümerik olarak optimizasyon yöntemleri ile tahmin edilmelidir. EM Algoritması (Tan et al., 2005; Dempster et al., 1977; Bilmes, 1998) bu amaçla öne sürülmüş bir optimizasyon yöntemidir. EM algoritması istatistiksel modellerin parametrelerinde kullanılan, gözlemlenmemiş gizli değişkenlere dayalı doğrusal olmayan optimizasyon yöntemidir.

GMM'nin parametreleri, Θ , orjinal dağılımdan gelen örnekler $X = \{\mathbf{x}_i; 1 \leq i \leq M\}$ kullanılarak, benzerliği yükselterek tahmin edilebilir:

$$\Theta = \operatorname{argmax} P(X|\Theta) = \operatorname{argmax} \prod_{i=1}^M \left(\sum_{k=1}^N \alpha_k g(\mathbf{x}_i; \boldsymbol{\mu}_k, \kappa_k) \right). \quad (8.5)$$

EM algoritması kullanılarak GMM parametreleri tahmin edilirken, $Z = \{\mathbf{z}_i; 1 \leq i \leq M\}$ gizli değişkenleri, i. örneğin hangi bileşenden geldiğini gösterecek şekilde tanımlanarak kullanılır.

$$X_i | (Z_i = k) \sim G(\boldsymbol{\mu}_k, \kappa_k) \text{ where } P(Z_i = k) = \alpha_k \text{ and } \sum \alpha_k = 1 \quad (8.6)$$

EM algoritması iteratif olarak iki aşamanın ardarda tekrarlanmasından oluşur. Beklenen değer aşaması adı verilen ilk aşamada, ölçülen X değerleri ve tahmini parametreler verildiğinde Z'nin log-benzerliğinin beklenen değeri bulunur. Yükseltme

aşaması olan ikinci aşamada ise, birinci aşamada hesaplanan beklenen değerleri yükselten parametreler tahmin edilir. Ardarda gerçekleştirilen bu aşamalar yerel maksimuma ulaşmayı garantiler. Fakat, yerel maksimum her zaman istenen sonuç olmayabilir. Bu nedenle başlangıçta parametre tahmininin iyi yapılması gerekir.

Önerdiğimiz yöntemde, başlangıç tahmini için öncelikle örneklerin küresel koordinatlarda geniş aralığa sahip olan eksenini seçiyoruz. Daha sonra bu örnekleri seçilen eksende n eşit aralığa bölerek kümeler oluşturuyoruz. Son olarak her küme farklı bir küresel normal dağılımı ifade edecek şekilde parametreleri tahmin ediyoruz.

8.4 BRDF'in GMM ile Modellenmesi

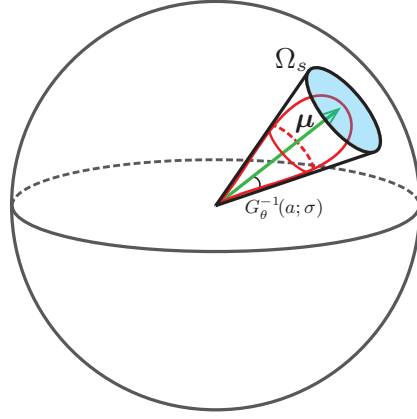
Önerilen ilk yöntemde BRDF GMM ile modellenmiştir. Önceden belirlenmiş bakış açıları, $V = \{\mathbf{o}_j\}$, için, BRDF'in parlak bileşeni ile Lambert teriminin çarpımı ışık yönüne, \mathbf{i} , göre küresel bir fonksiyon oluşturmaktadır. Bu fonksiyonlar GMM ile modellenebilir:

$$\rho(\mathbf{i}, \mathbf{o}_j)(\mathbf{n} \cdot \mathbf{i}) \cong \sum_{k=1}^N \alpha_{k,j} g(\mathbf{i}; \boldsymbol{\mu}_{k,j}, \kappa_{k,j}) \quad (8.7)$$

Burada ρ BRDF fonksiyonu iken, \mathbf{i} gelen ışık yönüdür. \mathbf{o}_j , önceden belirlenmiş bakış açılarından j 'incisidir. \mathbf{n} yüzey normali ve g_j 'de $\boldsymbol{\mu}_{k,j}$ ve $\sigma_{k,j}$ parametrelerine sahip küresel normal dağılım fonksiyonudur. Bu GMM'nin parametreleri her bir bakış açısı için tahmin edildiğinde, daha sonra ışıklandırma amacıyla kullanmak için k ve j ile parametrize edilmiş dokularda saklanabilir.

8.5 GMM'nin Gerçek-Zamanlı Işıklıdırma Kulllanması

Küresel normal dağılımlar radyal simetrik olduklarından, gerçek zamanlı ışıklandırmalarda, çevresel ışığın hızlı bir şekilde filtrelenmesinde kullanılabilirler. SG'nin ortalama yön vektörü parametresi $\boldsymbol{\mu}$, çevresel ışık dokusundan ışık şiddeti okumak için kullanılırken, κ parametresi ise dağılımın şeklini belirlediğinden, o yön etrafından ne kadar pikselin ortalaması alınacağını belirler. Colbert ve Krivanek, önerdikleri yöntemde (Colbert and Krivanek, 2007) BRDF'ten üretilen örnekleri olasılıklarına göre filtrelerken benzer bir yaklaşım uygulamışlardır. Burada ortalama alırken, GPU'nun mipmapping özelliği kullanılmıştır. Görüntü piramidi seviyesi, ortalaması alınması gereken piksel sayısına göre hesaplanabilir, bu nedenle, küresel normal dağılımın yüksek oranda kapsadığı katı açının bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 8.1. Küresel normal dağılım ve parametreleri (Töral et al., 2014).

Genellemeyi kaybetmeden μ vektörünün birim-z eksenine olduğu varsayıldığında, küresel normal dağılımın κ parametresine göre ne kadarlık bir katı açı kapsadığı, Ω_s , kolaylıkla hesaplanabilir. Bunun için küresel koordinatlarda θ açısına göre kümülatif marjinalin hesaplanması yeterlidir:

$$G_\theta(\theta; \kappa) \cong 1 - e^{\kappa(\cos\theta - 1)}$$

Bu kümülatifin tersi alındığında, istenilen a oranında kapsamanın ne kadarlık bir θ aralığına denk geldiği hesaplanabilir:

$$G_\theta^{-1}(a; \kappa) = \arccos\left(\frac{\log(1-a)}{\kappa} + 1\right)$$

θ aralığından kapsanan katıaçı hesaplanabilir:

$$\Omega_s = 2\pi \int_0^{G_\theta^{-1}(a; \kappa)} \sin\theta d\theta = -\frac{2\pi \log(1-a)}{\kappa}.$$

Küresel normal dağılımın parametreleri ve eşitliklerde kullanılan terimler Şekil 8.1’de görülmektedir.

Çevresel ışık dokusundaki piksel sayısını hesaplayabilmek için bir pikselin kapsadığı katıaçıyı Ω_p da bilmek gerekir. Bu katı açı Colbert ve Krivanek’in önerdiği (Colbert and Křivanek, 2007) gibi hesaplanabilir:

$$\Omega_p = \frac{d(\mathbf{i})}{w \cdot h} \quad (8.8)$$

Burada $d(\mathbf{i})$ çevresel ışık dokusu parametrisasyonundan kaynaklanan bozulma faktörüdür ve w, h ise bu dokunun boyutlarıdır.

Işıklandırma sırasında ihtiyacımız olan ışık şiddetlerinin ortalamasının okunulması gereken görüntü piramidi seviyesi hesaplanan katıaçıların oranlarının logaritması ile hesaplanır:

$$I = \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{\Omega_s}{\Omega_p} \right) = \frac{1}{2} [\log_2 (-2\pi \log (1 - a)) - \log_2 \kappa + \log_2 (w \cdot h) - \log_2 d(\mathbf{i})]. \quad (8.9)$$

Eşitlik 8.9'daki ilk terim sadece pürüzsüzlüğü belirleyen a parametresine bağlıdır. İkinci terim SG parametresine, üçüncü terim de çevresel ışık dokusunun boyutlarına bağlıdır. Bu üç terim önceden hesaplanıp saklanabilir. Son terim ise bakış açısına bağlı bozulma faktörü olduğundan gerçek zamanlı olarak hesaplanması gerekmektedir. Çevresel ışık dokusunda parametrizasyon olarak ilikli paraboloid haritalama (Heidrich and Seidel, 1998) kullanıldığından bu bozulma faktörü aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır:

$$d(\mathbf{i}) = 4b^2 (|\mathbf{i}_z| + 1)^2 \quad (8.10)$$

b burada her iki paraboloidin de diğer taraftan bilgi içermesini sağlayan ölçeklendirme parametresidir. (Colbert and Křivánek, 2007).

Özetle; her \mathbf{o}_j bakış açısı için, EM algoritmasını kullanarak, 32 küresel normal dağılımın parametreleri tahmin edilmekte ve $\alpha_{k,j}$, $\sigma_{k,j}$ ve $\mu_{k,j}$ yön vektörünün küresel koordinatları bir dokuda saklanmaktadır. Işıklandırma sırasında ise, tanjant uzayında bakış vektörü hesaplanıp ilgili bakış açısı için önceden hesaplanmış GMM modelinin parametreleri kullanılarak, her bir küresel normal dağılımın katkısı mip-mapping yardımıyla hesaplanmaktadır.

8.6 Çekirdek Kestirimi Yöntemi ile Alternatif Çözüm

Geliştirilen ilk yöntem, önhesaplama yaparak, ışıklandırmanın hesap süresini kısaltmıştır, fakat, bakış açılarına göre birbirinden bağımsız GMM modelleri tahmin edildiğinden interpolasyon mümkün değildir ve bloklanma problemi görülmektedir. Bu problem daha fazla sayıda bakış açısı kullanılarak kısmen çözülsede bu işlem hem önhesaplama maliyetini hem de saklanması gereken veri miktarını artırır. Bu nedenle interpolasyona uygun farklı bir yöntem geliştirilmesi uygun görülmüştür.

Wang et.al.'ın önerdiği yöntem (Wang et al., 2009) SG parametrelerini bakış açısına göre analitik bir fonksiyonla hesapladığından interpolasyona ihtiyaç duymaz. Fakat, çevresel ışık dokusunun filtrelenmesini gerektirmektedir. Makalelerinde belirli κ değerleri için önceden filtrelenmiş bir çevresel ışık dokusunun kullanılmasını önermişlerdir. Farklı mazlemelerin bulunduğu bir sahnede, farklı bakış açıla-

rında çok farklı κ değerleri ile filtrelenmiş ışığa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle önceden filtrelenmiş çevresel ışık dokuları yeterli olmamaktadır.

Önceden filtreleme ihtiyacını ortadan kaldırmak amacıyla ilk önerdiğimiz yöntemde uygulanan görüntü piramidi seviyesi seçim yöntemi Wang et.al.'ın önerdiği bu yöntemde denenmiştir. Fakat Wang et. al.'ın önerdiği yöntem tek bir küresel normal dağılım oluşturmaktadır ve özellikle mat malzemelerde bu küresel normal dağılım geniş bir katiyaçı kapsar. Bu yüzden hata oranı yüksek olmuştur. Bu nedenle verilen tek bir küresel normal dağılımın varyansı daha düşük birden fazla küresel dağılımlarla modelleme üzerine çalışılmıştır.

İstatistikte Çekirdek Yoğunluk Kestirimi (*Kernel Density Estimation - KDE*) bir şans değişkeninin olasılık dağılım fonksiyonunu tahmin etmek için kullanılan parametrik olmayan bir yöntemdir. Bu yöntemde o dağılımdan gelen örnekler, üzerinden bir kernel fonksiyonu geçirilerek, olasılık dağılım fonksiyonu hesaplanmaktadır.

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (8.11)$$

Burada K simetrik ve integrali bire eşit olan bir fonksiyondur. $h > 0$ ise bant genişliği denilen yumuşatma parametresidir. KDE'nin verimli sonuçlar üretmesi için bant genişliği örneklere göre özenle seçilmelidir. Tek boyutlu dağılımlarda kernel fonksiyonu olarak normal dağılım kullanıldığında bant genişliğinin optimal değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Silverman, 1986).

$$h = \left(\frac{4\sigma^5}{3n}\right)^{\frac{1}{5}} \approx 1.06\sigma n^{-\frac{1}{5}} \quad (8.12)$$

Önerdiğimiz ikinci yöntemde, verilen bir küresel normal dağılımdan n adet daha sivri dağılım oluşturulmaktadır. Bunun için dağılımdan özenle seçilmiş n örnek kullanılmaktadır. KDE yöntemi ile yine kernel fonksiyonu olarak küresel normal dağılımlar kullanılmaktadır. Kullandığımız dağılımlar çok boyutlu olduğundan Silverman'ın önerdiği bant genişliği tahmini optimum sonucu vermemektedir. Fakat, Garcia-Portugues, makalesinde (García-Portugués, 2013) küresel dağılımlar için bir bant genişliği yöntemi önermiştir. Önerdiğimiz bu yöntemde Garcia-Portugues'in önerdiği bant genişliği tahmini kullanılmıştır.

Önerdiğimiz ikinci yöntemde ışıklandırma sırasında özetle şu aşamalar gerçekleştirilmektedir:

- Bakış açısı hesaplanır.
- Bakış açısı ve BRDF parametreleri kullanılarak Wang et al. (2009)'ın önerdiği yöntem ile tek bir SG dağılımı üretilir.
- KDE yöntemi ile bu SG dağılımı daha yüksek varyansa sahip n adet dağılıma bölünür.
- n adet küresel normal dağılım için mipmapping yöntemi ile ışığın katkısı hesaplanır.

Bu yöntem herhangi bir önhesaplama işlemine ihtiyaç duymamaktadır. Bu yüzden dinamik sahnelerde kullanılabilir.

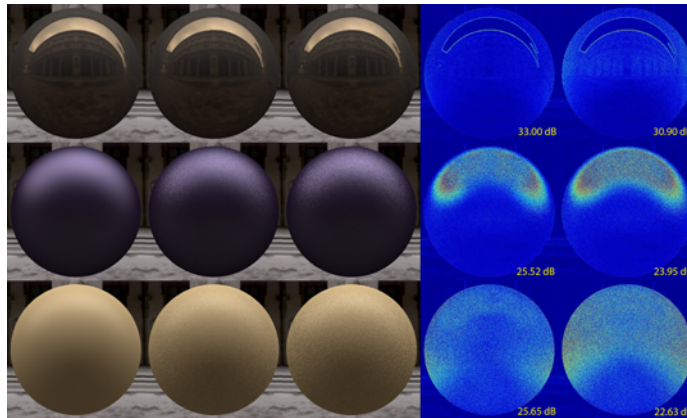
9. SONUÇLAR

9.1 Kd-Ağacı Önemine Göre Örnekleme Yöntemi Sonuçları

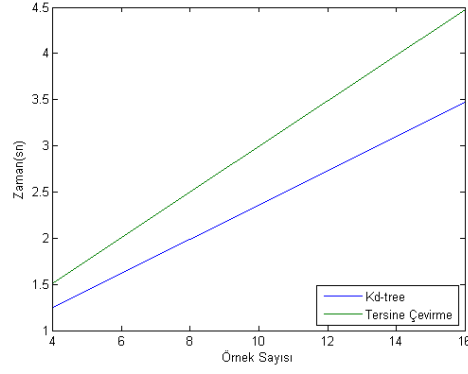
Kd-ağacı önemine göre örnekleme yöntemi CDF'e dayalı önemine göre örnekleme yöntemi ile zaman ve hafıza karmaşıklığı ile görüntü kalitesi açısından karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem de Merkezi İşlem Birimi (*Central Processing Unit - CPU*) üzerinde çalışan fiziksel tabanlı görüntü oluşturma aracı, (*Physically Based Rendering Toolkit, PBRT*) (Pharr and Humphreys, 2010) üzerine geliştirilmiştir. Bu bölümdeki sonuçlar geliştirilen yazılımın 12 GB hafızaya sahip Intel Core i7-920 (2.67 GHz) işlemcili bir makine üzerinde çalıştırılması ile elde edilmiştir.

$n \times m$ çözünürlüğe sahip bir çevresel ışık görüntüsü için CDF'e dayalı önemine göre örnekleme yönteminin hafıza karmaşıklığı $O(n \times m)$, hesaplama karmaşıklığı ise $O(\log(n \times m))$ 'dir. Bunun yanı sıra kd-ağacı yönteminin b blok için hafıza karmaşıklığı $O(b)$; hesaplama karmaşıklığı ise $O(1)$ 'dir.

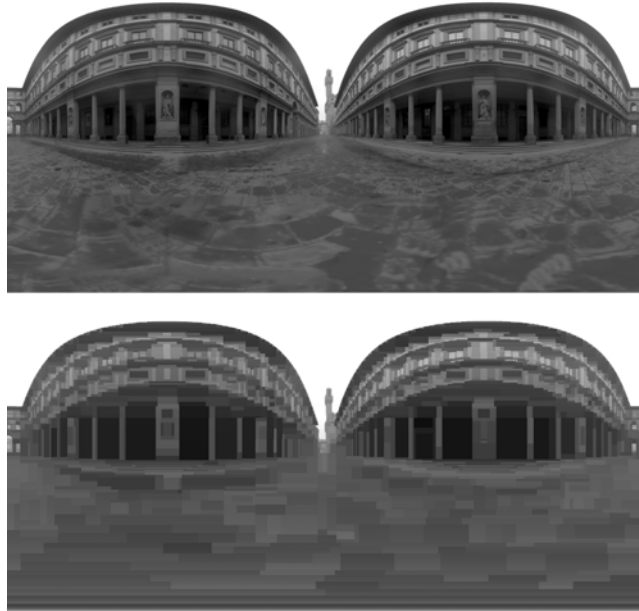
Her iki yöntem ile oluşturulan görüntüler ve Tepe Sinyal Gürültü Oranı (*Peak Signal-to-Noise Ratio - PSNR*) değerleri Şekil 9.1'de görülmektedir. Şekilde yukarıdan aşağıya chrome-steel, metallic-blue ve white-diffuse malzemeleri kullanılmıştır. Görüntüler oluşturulurken CDF'e dayalı örnekleme yöntemi ortalama olarak 973ms Kd-ağacı yöntemi ise 963ms ön hesaplama ihtiyacı duymuşlardır. Örnek türetme sırasında yöntemlerin harcadıkları zaman ise Şekil 9.2'de görülmektedir. Ayrıca örnek bir çevresel ışık görüntüsü için kd-ağacı yöntemiyle sıkıştırılarak tekrar oluşturulmuş bir görüntü Şekil 9.3'te görülmektedir.



Şekil 9.1. Referans görsel, Kd-ağacı ve CDF'e dayalı örnekleme yöntemi ile oluşturulmuş görüntüler.



Şekil 9.2. Kümülatif olasılık dağılım fonksiyonlarına dayalı önemine göre örnekleme ve Kd-ağacı önemine göre örnekleme yöntemlerinin çalışma zamanları.



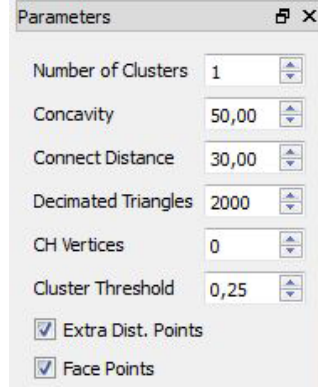
Şekil 9.3. Üstte Uffizi çevresel ışık şiddeti ve altta bu görüntünün Kd-ağacı yöntemi ile 1:170 oranında sıkıştırılıp yeniden oluşturulmuş hali görülmektedir.

9.2 Dışbükey Görünürlük Testi Yöntemi

9.2.1 Dışbükey ayrıştırma sonuçları

Geliştirilen dışbükey ayrıştırma aracında Princeton Shape Benchmark veritabanından (Shilane P., 2004) gelişigüzel seçilmiş geometrilerin dışbükey ayrıştırılmaları Şekil 9.4’de görülen parametreler kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan dışbükey ayrıştırılmalar ve küme sayıları Şekil 9.5’te verilmiştir.

Geometrilerin her dışbükey parçası için küresel düzlem haritası oluşturulup bu haritalar parçaların büyüklükleri ile orantılı olarak ölçeklendirilerek tek bir harita



Şekil 9.4. HACD yönteminde kullanılan parametreler.

içerisine paketlenmiştir. Böylece çok sayıda dokunun ekran kartında neden olacağı maliyetli context değiştirme işleminin önüne geçilmiştir. Princeton Shape Benchmark veritabanındaki *bunny* şekli için hazırlanıp paketlenmiş küresel düzlem haritası Şekil 9.6’de görülmektedir. Bu haritada her düzlem haritası için düzlemin normal ve merkeze olan uzaklığı renk bilgisi olarak kodlanarak saklanmıştır.

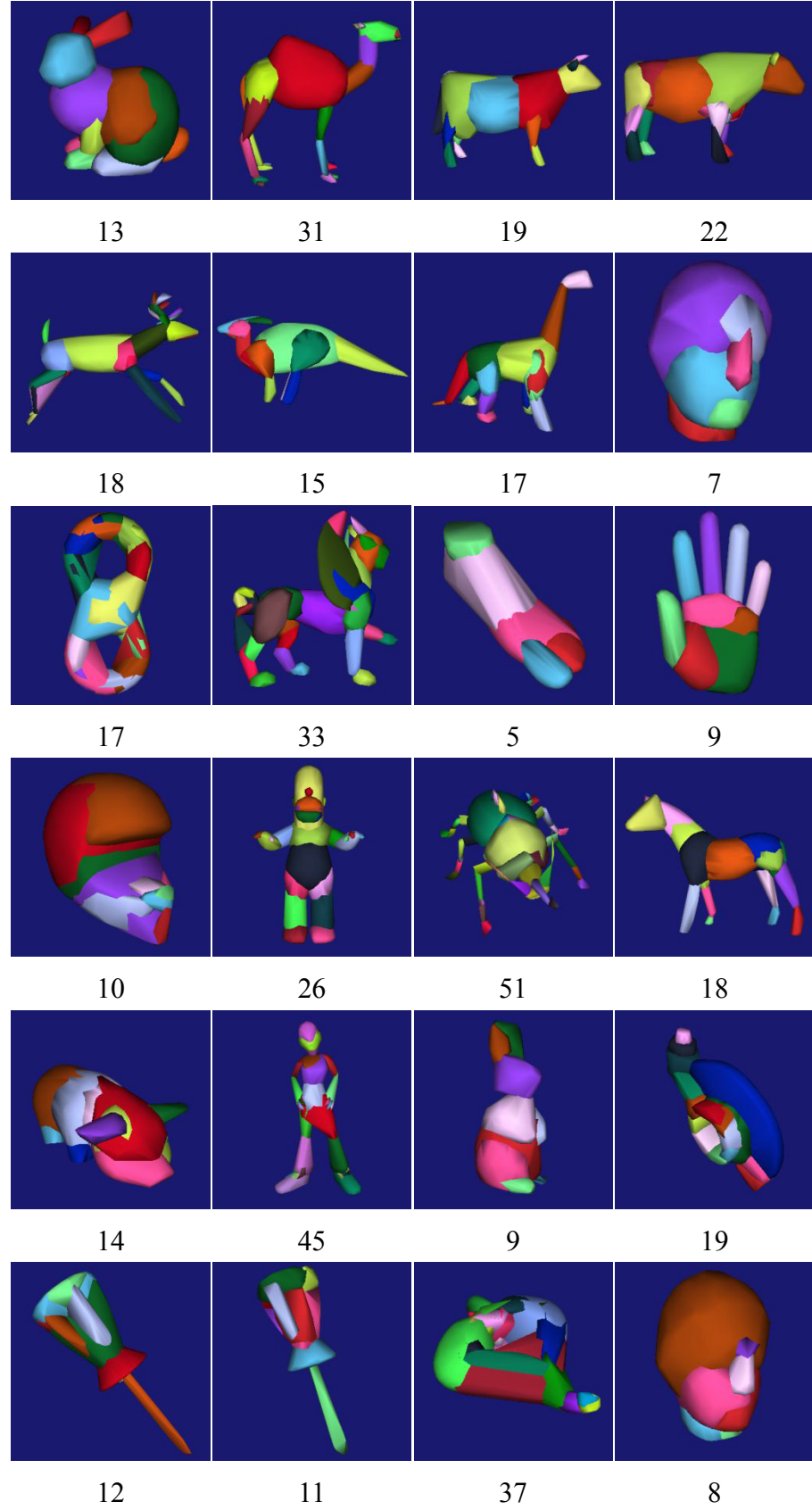
9.2.2 Görünürlük testi sonuçları

OptiX kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiş uygulama farklı çevresel ışıklar altında farklı malzemeler için test edilmiştir. Test sahnesi ve farklı malzemeler Şekil 9.7’de görülmektedir. Bu sahne, son kullanıcı dizüstü bilgisayarlarında interaktif olarak çalışabilmektedir (saniyede yaklaşık 15 kare). Ayrıca, ışıklandırmanın (ve gölgelendirmenin); izotropik, anizotropik, mat, yarı parlak ve de parlak olmak üzere tüm malzeme çeşitlerinde çalışabildiği gözlemlenmektedir.

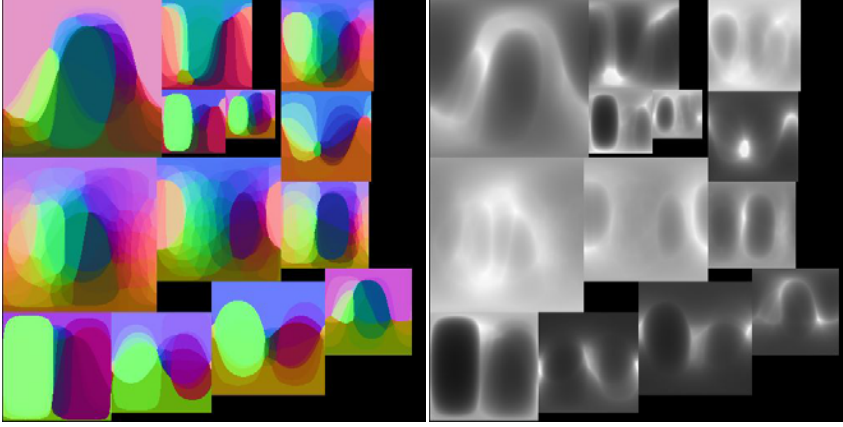
9.2.3 Yöntemin parametrelerinin kalite ve hıza etkileri

Dışbükey kesişim testi algoritmasının hız ve kalitesini önemli bir ölçüde etkileyen aşaması objelerin dışbükey parçalara ayrılmasıdır. Bu aşamada kullanılan parametrelere göre oluşturulan dışbükey parça sayısı değişmektedir. Bu da kesişim testinin hem hızını hem de kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu parametrelerden en önemlisi olan kabul edilebilir içbükeylik derecesi doğrudan oluşturulan dışbükey nesne sayısını etkiler. Bu nedenle örnek bir geometride bu parametrenin hız ve kaliteyi nasıl etkilediği incelenmiştir.

Şekil 9.8a’da görüldüğü gibi izin verilen içbükeylik oranı arttıkça oluşturulan dışbükey parça sayısı logaritmik azalmaktadır. Ayrıca Şekil 9.8b’de görüldüğü gibi izin verilen içbükeylik derecesi arttığında oluşan dışbükey geometri sayısı azaldığından saniyede üretilen görüntü sayısı artmaktadır.



Şekil 9.5. Princeton Shape Benchmark veritabanından seçilmiş geometrilerin HACD algoritması ile oluşturulmuş dışbükey ayrıştırmaları ve toplam küme sayıları.



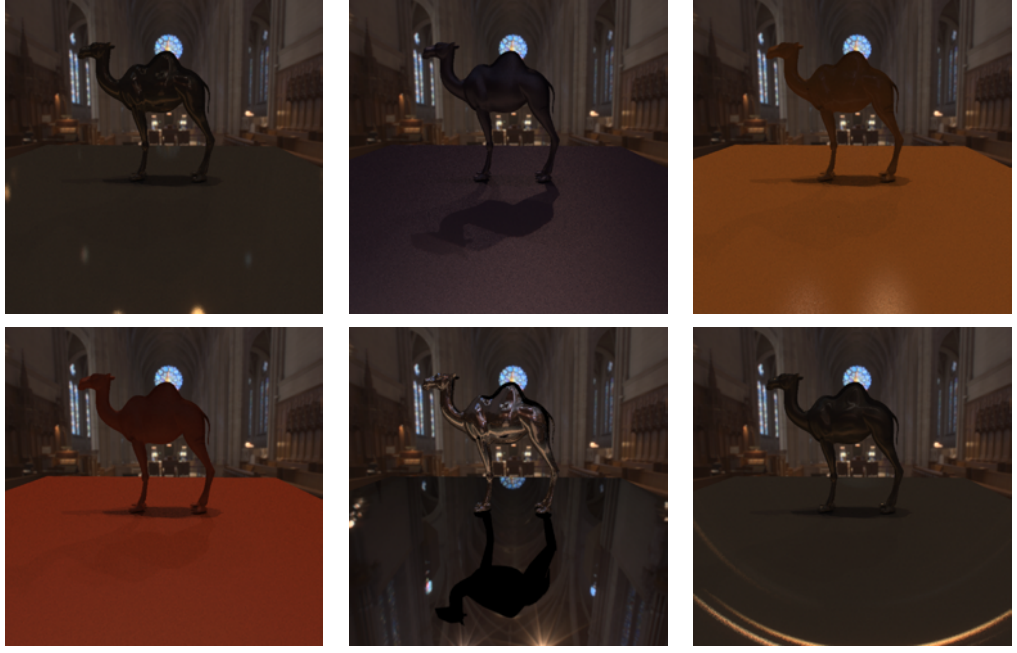
Şekil 9.6. Princeton Shape Benchmark veritabanındaki *bunny* geometrisi için hazırlanıp paketlenmiş küresel düzlem haritası.

Oluşturulan dışbükey geometri sayısı arttığında kalitenin artması beklenmektedir fakat, geometri arttıkça geometrilerin birbirleriyle kesiştikleri alanlar artmakta bu da kesişen kenarlarda özgülendirmeye problemine neden olmaktadır. Geometri sayısı da belirli bir miktarın altına indiğinde, oluşan gölgelerde geometrik bozulmalar görülebilmektedir. Şekil 9.8c’de bu durum gözlenmektedir. İçbükeylik oranı %40 seviyelerindeyken PSNR değeri maksimuma ulaşmakta fakat daha yüksek içbükeylik oranları için PSNR değerleri düşmektedir.

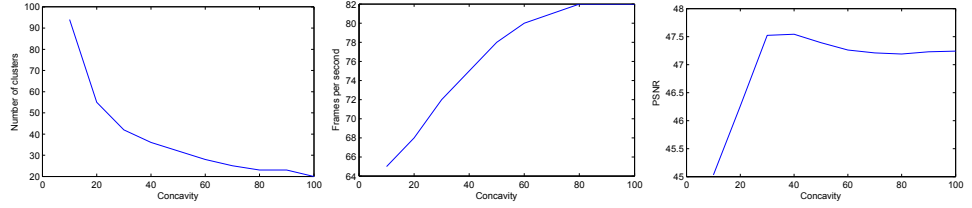
9.2.4 Karşılaştırmalar

Önerilen dışbükey kesişim testini karşılaştırmak amacıyla öncelikle referans yöntem olarak BVH ağacına yerleştirilmiş üçgenlerin kesişim testi kullanılmaktadır. Bu yöntem kalite olarak en doğru görüntüyü vermektedir. Bu sebeple bu yöntemin gerçekleştirimi aynı ortamda (NVIDIA Optix) gerçekleştirilmiştir.

Bunun dışında dışbükey kesişim testine benzer bir yaklaşım algoritması olan Rasterize Edilmiş Kapsayan Hacim Hiyerarşisi (*Rasterized Bounding Volume Hierarchy - RBVH*) kesişim testi de aynı uygulamada gerçekleştirilmiştir. Jan Novák ve Carsten Dachsbacher’in geliştirdiği Rasterize Edilmiş Kapsayan Hacim Hiyerarşisi RBVH (Novák and Dachsbacher, 2012) yöntemi karmaşık modellerde ışın izlemeyi hızlandıran ve ayarlanabilir detay seviyesi sağlayan bir yöntemdir. Yöntem BVH yapısı üzerinde çalışır. Bu yapının oluşturulması sırasında, ağacın yükseklik haritası (*heightmap*) olarak ifade edilebilecek alt dallar tespit edilir. Birçok üçgen içermesi muhtemel bu alt dallarda kesişim noktasını bulmak için geleneksel ışık-yüzey kesişim testi yerine daha basit bir ışın yürütme (*ray marching*) yöntemi kullanılmaktadır. Veri yapısı oluşturma ve ışın izleme işlemleri tamamen ekran kartında yapılmaktadır.



Şekil 9.7. Farklı malzemeler için oluşturulan görüntüler.



Şekil 9.8. Armadillo geometrisi için içbükeylik derecesine göre (a) oluşturulan dışbükey nesne sayısının (b) görüntü tazeleme oranının (c) referans görüntüyle olan PSNR değerlerinin değişimi.

Gerçekleştirilen bu iki yöntem (RBVH ile Dışbükey) aynı ışıklandırma ve sahne koşullarında referans yöntemine göre hız ve kalite bakımından karşılaştırılmışlardır.

9.2.5 Kalite

Stanford 3D Scanning Repository'inden seçilen geometriler kullanılarak referans yöntem, RBVH yöntemi ve önerilen dışbükey kesişim yöntemi aynı ışıklandırma ortamı altında test edilmiştir. RBVH ve dışbükey kesişim testinde standart parametreler kullanılmıştır. Oluşturulan görüntülerin referans görüntüye göre PSNR değerleri hesaplanmıştır. Şekil 9.9'de oluşturulan görüntüler ve PSNR değerleri görülmektedir. Standart parametreler kullanıldığında RBVH yönteminin dışbükey kesişim yöntemine göre daha kaliteli sonuçlar oluşturduğu görülmektedir. Fakat, PSNR değerleri incelendiğinde, 39'dan küçük değer görülmemektedir. 30

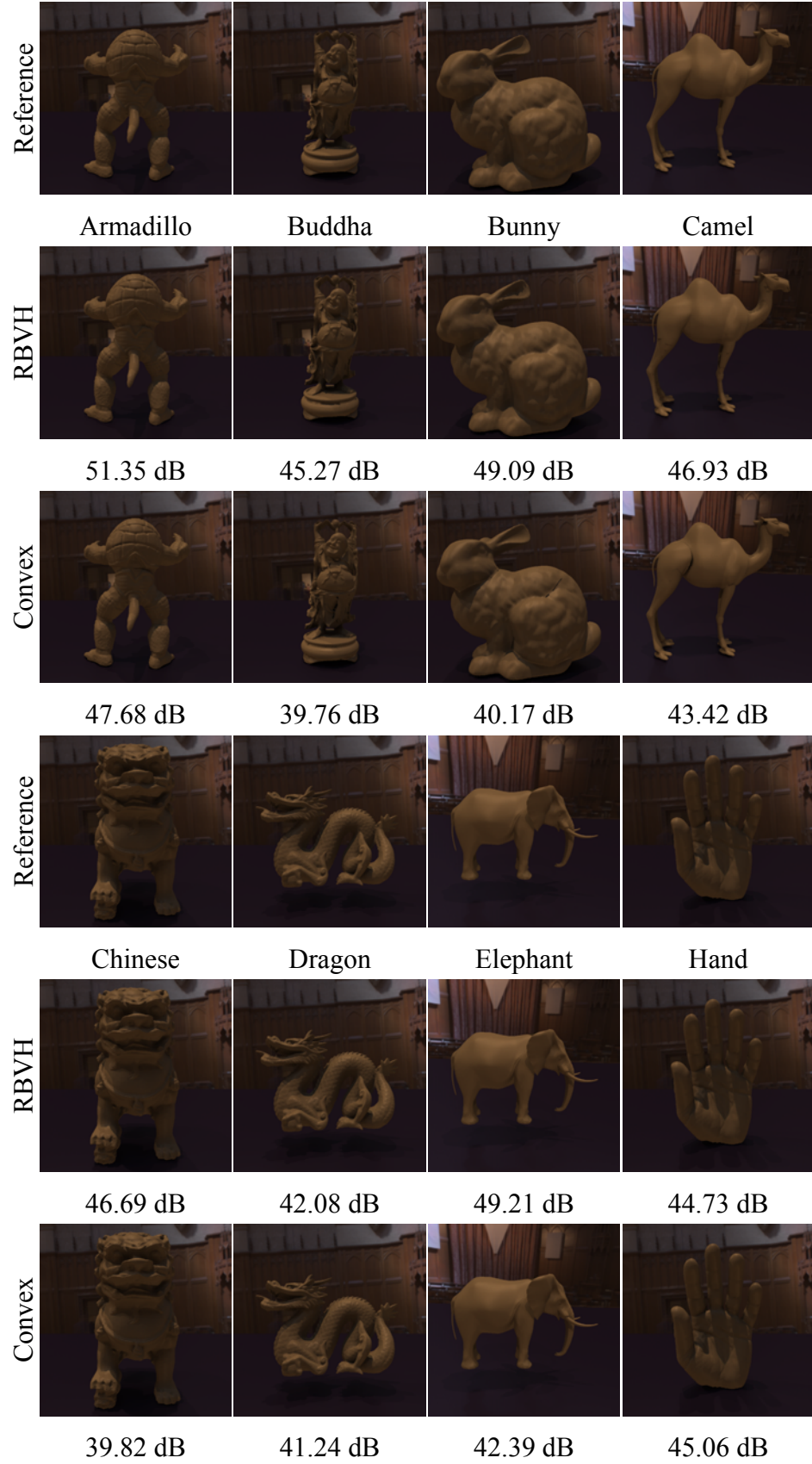
PSNR ve yukarısı kabul edilebilir olduğundan, her iki yöntemde de kaliteyi daha da iyileştirecek parametrelerin varolup olmadığı incelenmemiştir.

9.2.6 Hız

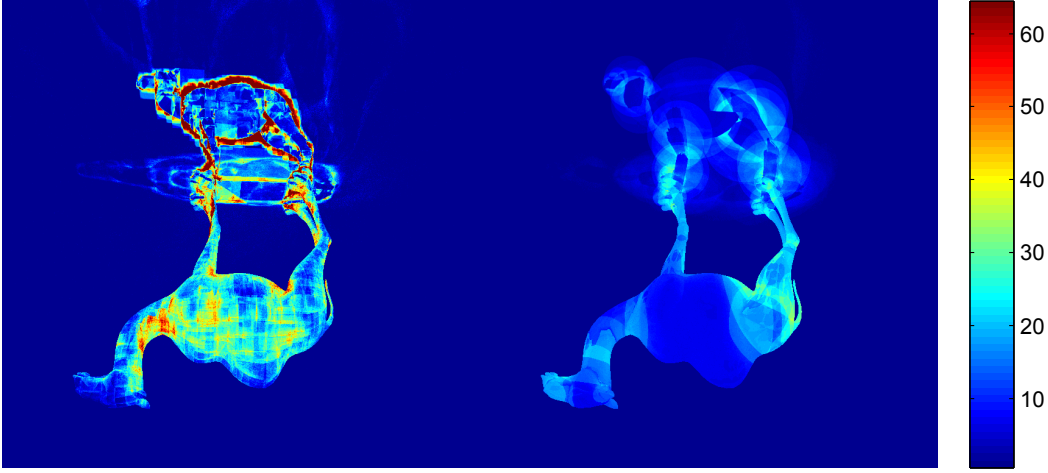
Tez kapsamında önerilen dışbükey kesişim testi yapı olarak RBVH (Novák and Dachsbacher, 2012) yöntemine benzemektedir. Her iki yöntemde de sahne belirli bir aşamaya kadar BVH ağacı ile modellenmektedir. RBVH yöntemi, ağacın **bazı** dallarını yükseklik haritaları ile ifade ederken, dışbükey kesişim testi, ağacın **her** dalını dışbükey nesnelere ifade etmektedir. Kesişim testi sırasında ise RBVH yönteminde yükseklik haritasından değerler okunarak ışın izlemesi yapılmaktadır. Dışbükey kesişim testinde ise dışbükey nesneyi oluşturan düzlemlerin denklemleri ile oluşturulan bir harita kullanılmaktadır. Dışbükey kesişim testinde denklem parametreleri saklandığından RBVH'a göre daha fazla veri gereksinimi vardır fakat, doku erişim sayısı çok daha az olduğundan hızlanma sağlanmaktadır.

Şekil 9.10'te örnek bir sahnede her iki yöntemin de ne kadar erişim yaptığı görülmektedir. RBVH yönteminde ortalama 8.04 doku erişimi yapılırken, Dışbükey kesişim testinde 3.68 doku erişimi yapılmaktadır. Ayrıca RBVH yönteminde doku erişim sayısının standart sapması 15.05 iken, dışbükey kesişim testinde bu değer 6.12'dir. Standart sapmanın daha düşük olduğu dışbükey kesişim testi ekran kartı donanımında paralelleştirmeye daha uygundur, çünkü bu durumda her iş parçasında (yani her pikselde) yapılacak işlem sayısı birbirine daha yakındır. Aynı grupta bulunan iş parçacıklarındaki işlem sayısı farklılık gösterdiğinde o grup içindeki iş parçacıkları, en yavaş olan iş parçacığını beklemek zorundadır.

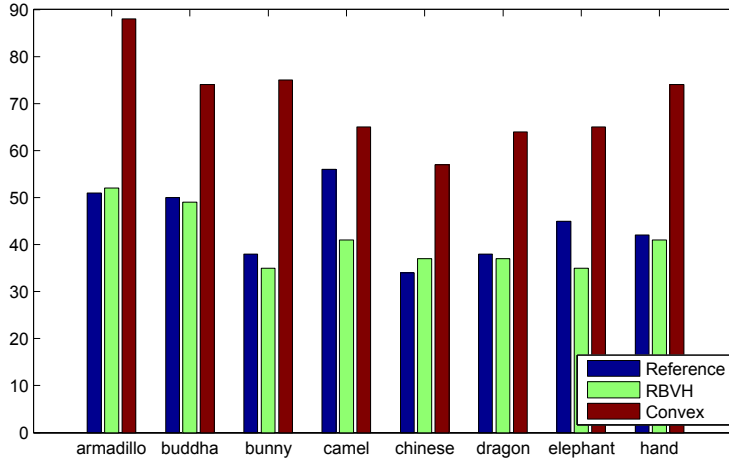
Ayrıca RBVH ve dışbükey yöntemi standart parametreleri kullanılarak 12 farklı geometri üzerinde test edilmiştir. Oluşturulan görüntülerin tazeleme oranı Şekil 9.11'de görülmektedir. Referans yöntem NVIDIA OptiX tarafından optimize edilmiştir. Diğer iki yöntemde herhangi bir optimizasyon yapılmadığından (RBVH yöntemi geometrinin yükseklik haritası olarak ifade edilemeyecek parçalarında referans yöntemi kullanmasına rağmen) referans yöntem ile diğer iki yöntemin hız karşılaştırmasını yapmak sağlıklı değildir. Fakat, RBVH ve dışbükey kesişim testlerinin hızları incelendiğinde dışbükey kesişim testinde önemli bir artışın olduğu görülmektedir.



Şekil 9.9. 12 farklı geometri için aynı malzeme ve ışıklandırma altında Referans yöntem RBVH ve Convex yöntemi ile görüntüler oluşturulup PSNR değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 9.10. Aynı sahne için Solda: RBVH yönteminin her pikselde doku erişim sayısı, Sağda: Önerilen dışbükey keşişim testinin doku erişim sayısı görülmektedir.



Şekil 9.11. Farklı geometriler için referans, RBVH ve Convex yöntemlerinin görüntü tazeleme oranları.

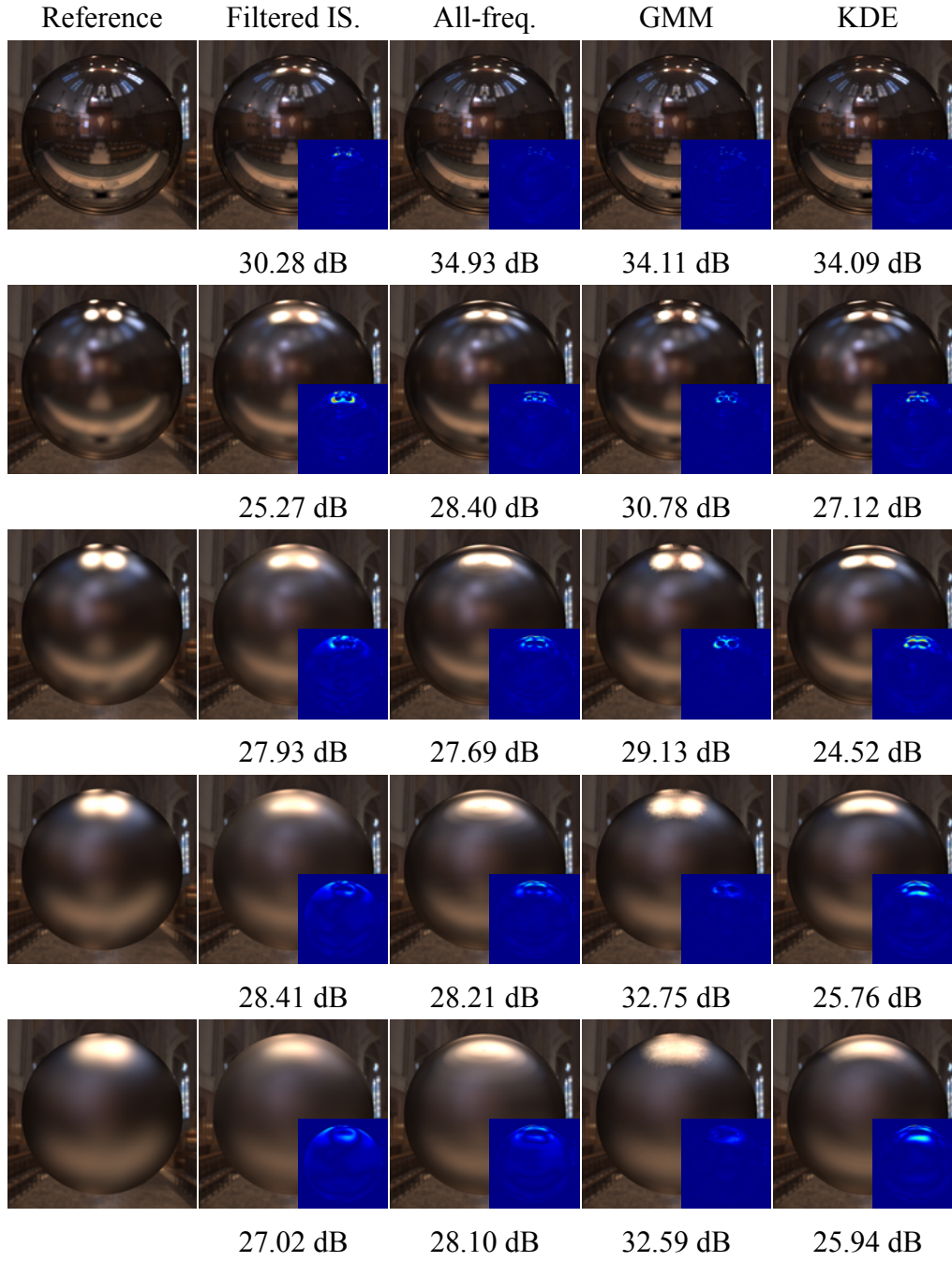
9.3 Küresel Normal Dağılımlarına Dayalı BRDF Modelinin Sonuçları

Küresel normal dağılımlar kullanılarak geliştirilen iki BRDF modeli de Ogre ortamında geliştirilmiş, Colbert ve Krivanek'in yöntemi ve Wang et.al.'ın yöntemi ile hız ve kalite bakımından karşılaştırılmıştır.

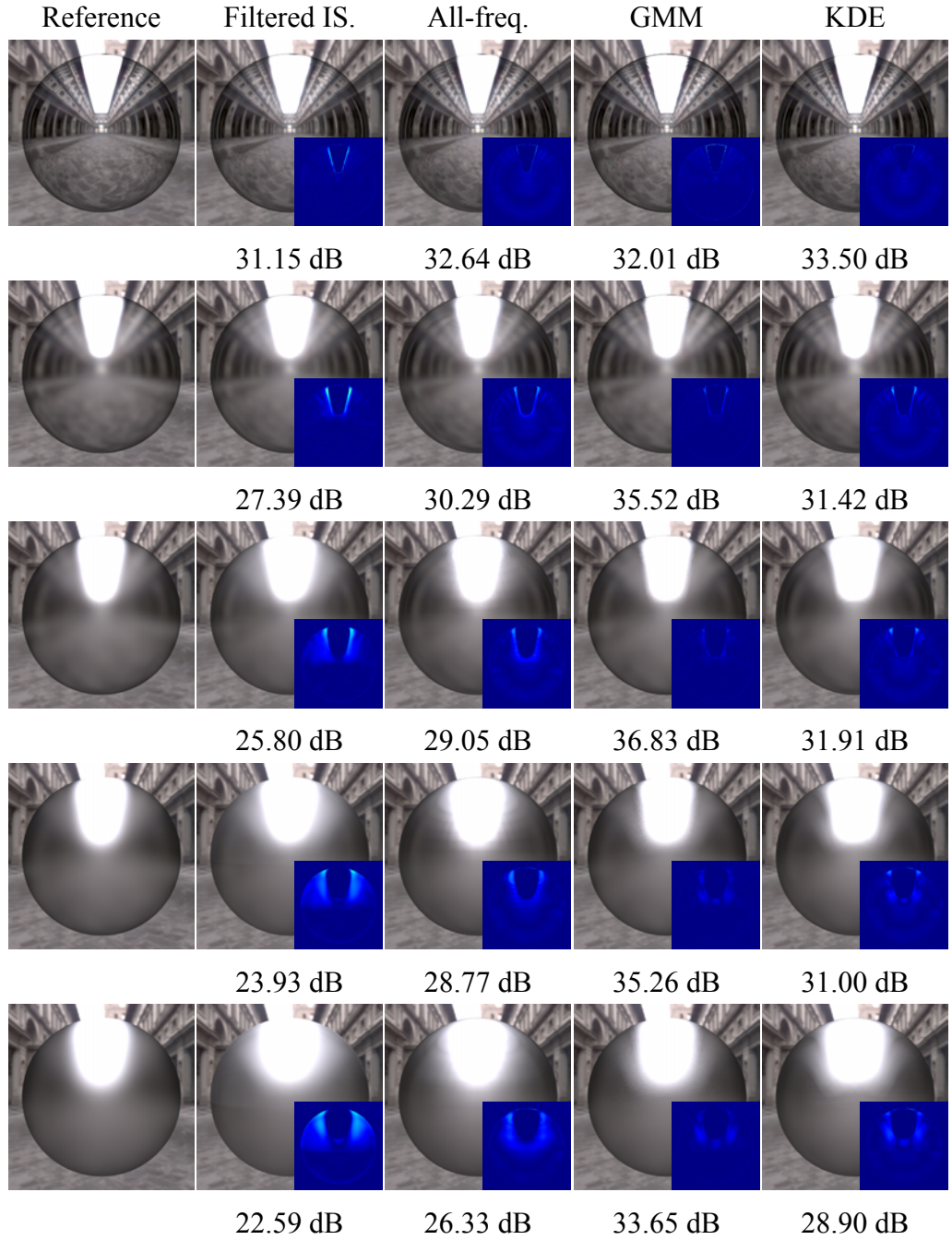
Hız bakımından en performanslı yöntem Wang.et.al.'ın önerdiği yöntemdir. (~5200 fps), Ardından önerdiğimiz KDE yöntemi gelmektedir (~1600 fps) GMM yöntemi 990 fps ile KDE'yi takip etmektedir. En yavaş kalan yöntem Colbert ve Krivanek'in önerdiği yöntemdir (~490 fps).

Kalite karşılaştırması için PBRT üzerinde aynı sahnenin görüntüleri oluşturulup referans görüntü olarak kullanılmıştır. Her bir yöntemle oluşturulan görüntülerin, referans görüntüsü ile olan PSNR değerleri karşılaştırılmıştır. Küre, çaydanlık, ejderha ve torus olmak üzere 4 farklı geometri için 4 farklı çevresel ışık altında (grace-new, uffizi, pisa, doge2) 5 farklı parlaklık seviyesinde malzeme kullanılan toplamda 80 farklı sahne oluşturulmuştur. Bu sahnelerden sadece küre geometrisi için olanları Şekil 9.12, Şekil 9.13, Şekil 9.14 ve Şekil 9.15 de görülmektedir.

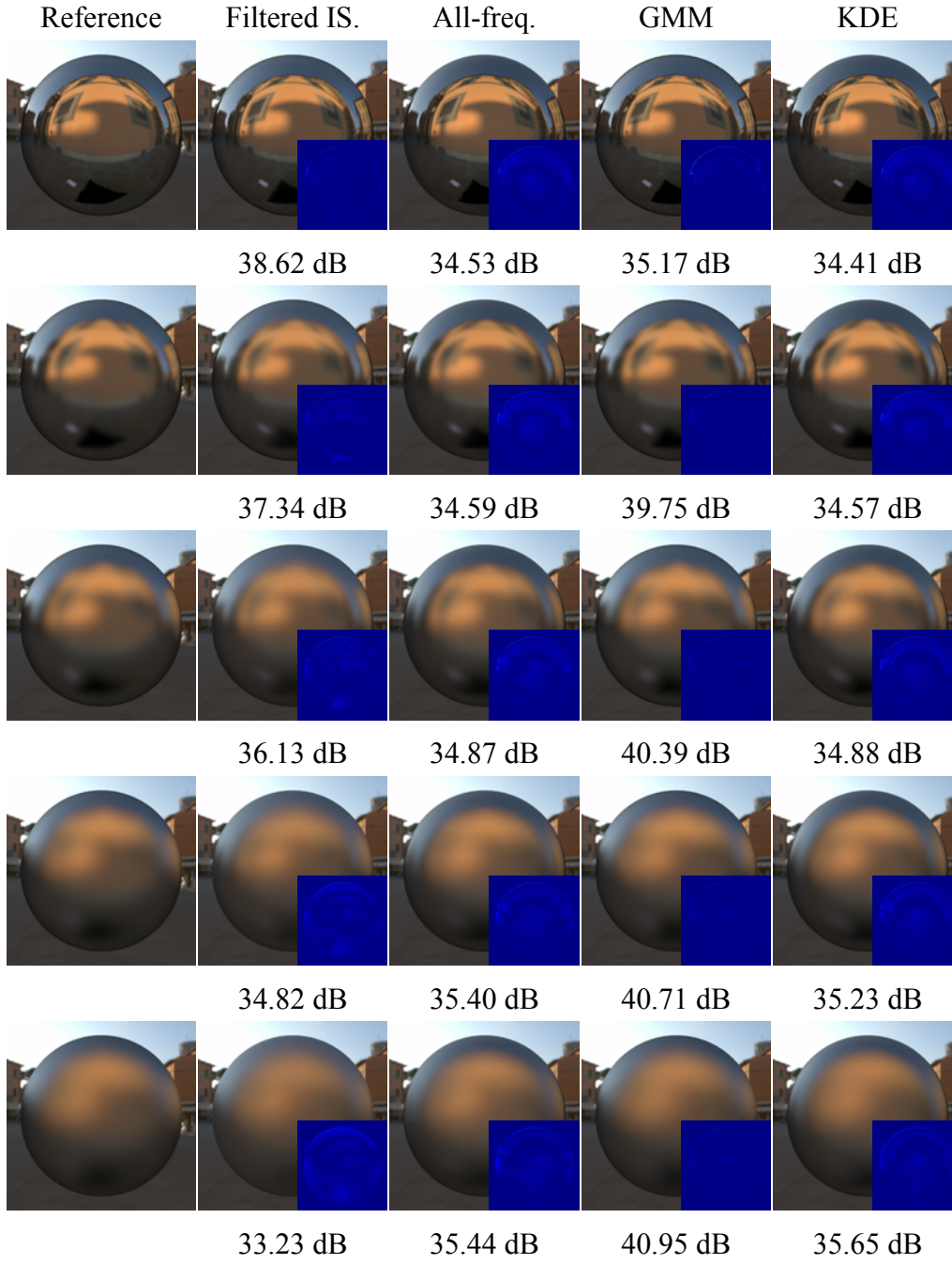
KDE yönteminde 80 farklı sahnenin 61'inde 30 dB PSNR'dan yüksek değerler elde edilmiştir. Wang et.al'ın önerdiği yöntem için bu değer 53, Colbert ve Krivanek'in önerdiği yöntem için ise 52'dir.



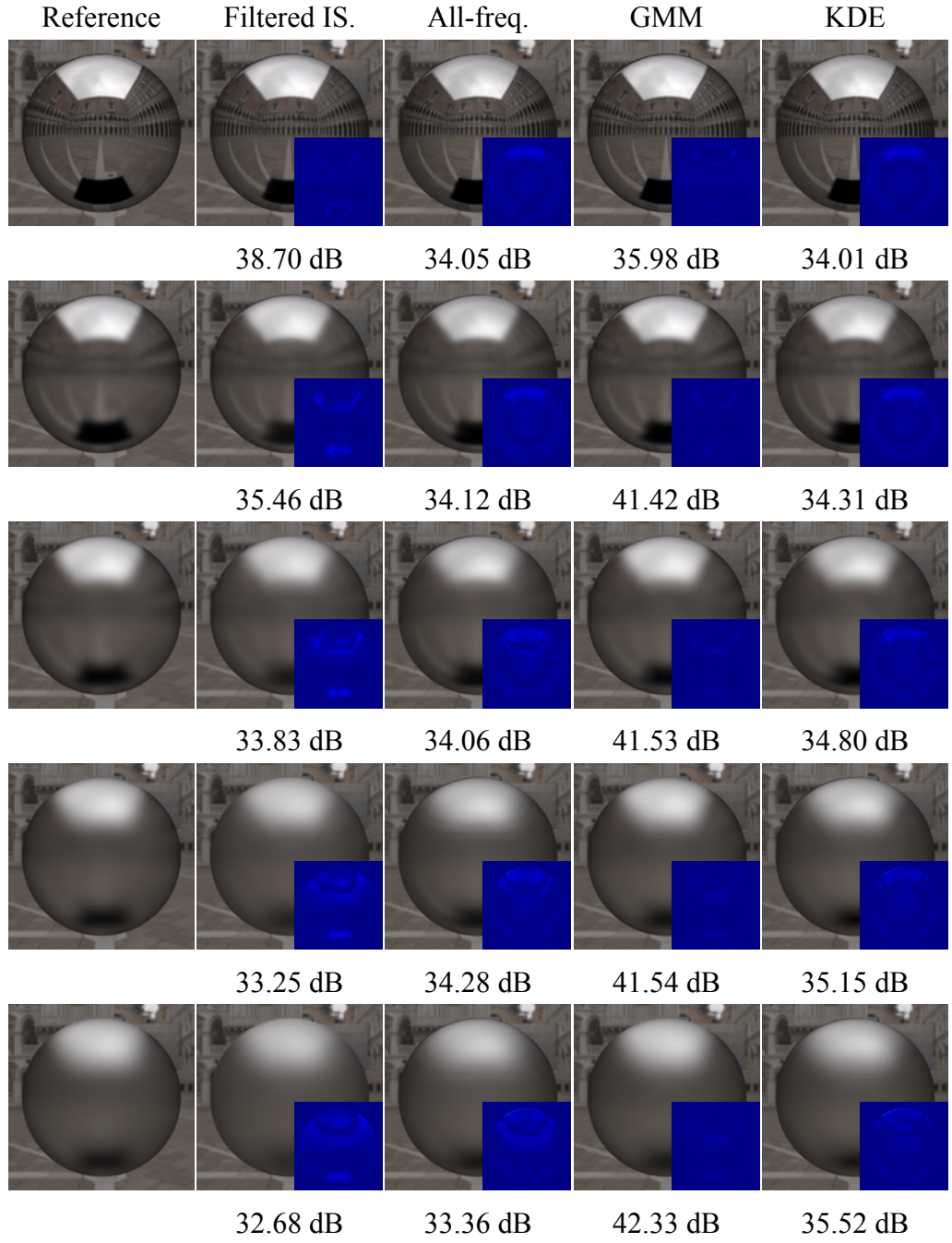
Şekil 9.12. Grace-new çevresel ışığı altında farklı metodlar kullanılarak farklı parlaklık seviyelerinde ışıklandırılmış küreler. Soldan sağa: referans görüntü, filtered importance sampling, all-frequency rendering, gaussian karışım modeli ve kernel density tahmini. Yukarıdan aşağıya: sırasıyla ($\alpha = 0.01; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$) parlaklık seviyeleri. Ekli küçük resimlerde ilgili yöntem ile oluşturulmuş görüntüler ile referans görüntü arasındaki farklar görülmektedir. Görüntülerin altında ise PSNR değerleri verilmiştir.



Şekil 9.13. Uffizi çevresel ışığı altında farklı metodlar kullanılarak farklı parlaklık seviyelerinde ışıklandırılmış küreler. Soldan sağa: referans görüntü, filtered importance sampling, all-frequency rendering, gaussian karışım modeli ve kernel density tahmini. Yukarıdan aşağıya: sırasıyla ($\alpha = 0.01; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$) parlaklık seviyeleri. Ekli küçük resimlerde ilgili yöntem ile oluşturulmuş görüntüler ile referans görüntü arasındaki farklar görülmektedir. Görüntülerin altında ise PSNR değerleri verilmiştir.



Şekil 9.14. Pisa çevresel ışığı altında farklı metodlar kullanılarak farklı parlaklık seviyelerinde ışıklandırılmış küreler. Soldan sağa: referans görüntü, filtered importance sampling, all-frequency rendering, gaussian karışım modeli ve kernel density tahmini. Yukarıdan aşağıya: sırasıyla ($\alpha = 0.01; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$) parlaklık seviyeleri. Ekli küçük resimlerde ilgili yöntem ile oluşturulmuş görüntüler ile referans görüntü arasındaki farklar görülmektedir. Görüntülerin altında ise PSNR değerleri verilmiştir.



Şekil 9.15. Doge2 çevresel ışığı altında farklı metodlar kullanılarak farklı parlaklık seviyelerinde ışıklandırılmış küreler. Soldan sağa: referans görüntü, filtered importance sampling, all-frequency rendering, gaussian karışım modeli ve kernel density tahmini. Yukarıdan aşağıya: sırasıyla ($\alpha = 0.01; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$) parlaklık seviyeleri. Ekli küçük resimlerde ilgili yöntem ile oluşturulmuş görüntüler ile referans görüntü arasındaki farklar görülmektedir. Görüntülerin altında ise PSNR değerleri verilmiştir.

10. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tezde literatürdeki global ışıklandırma yöntemleri incelenmiş, bu yöntemlerden gerçek zamanlı çalışabilen ve dinamik sahnelerde kullanıma uygun olanları detaylandırılmıştır. Ayrıca tez kapsamında dinamik sahnelerde gerçek zamanlı olarak çalışabilecek yeni üç ayrı yöntem geliştirilmiştir.

Bu yöntemlerden ilki, çevresel ışıklandırmanın gerçek zamanlı olarak öneme göre örneklenebilmesini sağlamıştır. Çevresel ışık kaynağına ilişkin görüntü, adaptif yaklaşımla oluşturulan bir kd-ağacı ile temsil edilerek, bunun örneklenebilmesini sağlayan yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntem görüntü bakımından, literatürdeki yöntemlerin kalitesine ulaşırken işlem zamanı ve bellek kullanımı bakımından da bunlara göre daha performanslı çalışmaktadır.

Tez kapsamında önerilen ikinci yöntem, dolaylı ışıklandırma sırasında kullanılacak bir görünürlük testidir. Literatürdeki yöntemler kesişim testlerini hızlandıran uzaysal veri yapılarını kullanmaktadır. Bu veri yapıları sahnedeki üçgenler için oluşturulur ve üçgen \times ışın kesişim testlerini kullanmaktadır. Sahnedeki üçgen sayısı çok fazla olabileceğinden, bu veri yapıları gerçek zamanlı olarak güncellenmeye elverişli değildir. Önerilen dışbükey kesişim testlerine dayalı yöntemde ise sahnede kullanılan geometriler ön hesaplama ile dışbükey parçalara bölünür. Uzaysal veri yapıları üçgenler yerine dışbükey parçalar için oluşturulur. Üçgen \times ışın kesişim testi yerine de dışbükey \times ışın kesişim testi yapılır. Yapılan önhesaplama sahnenin güncellenebilirliğini değiştirmez. Ayrıca, uzaysal veri yapıları daha az sayıda nesne için oluşturulduğu için güncelleme maliyeti azalır. Özetle görünürlük testleri dinamik sahnelerde kullanıma uygun şekilde ön hesaplama yapılarak hızlandırılmış olur.

Tez kapsamında öne sürülen son yöntem ise çevresel ışıklandırma altındaki sahnelerin görüntüsünün Monte Carlo simülasyonu yapmadan oluşturulabilmesini hedeflemektedir. Bu yönetime göre, sahnedeki malzemeleri tanımlayan BRDF modelleri küresel normal dağılımların karışımı ile ifade edilir. Çevresel ışıklandırma görüntüsü, küresel normal dağılımların radyal simetri özelliğinden yararlanılarak filtrelenir. Böylece görüntü oluşturma denklemindeki tümleştirme, gerçek zamanlı olarak hesaplanabilmektedir.

Kd-ağacı kullanılarak çevresel ışığın örneklenmesi yöntemi, sadece çevresel ışığın örneklenmesinde değil, çok boyutlu herhangi bir dağılımın örneklenmesinde de kullanılabilir. Yöntemde, kd-ağacının oluşturulmasında yapılacak değişiklikler

ile BRDF gibi şartlı olasılık dağılımlarından da örnek türetilbileceği düşünülmektedir.

Önerilen ilk iki yöntem Monte Carlo simülasyonları için geliştirilmiştir ve birlikte kullanımı mümkündür. Üçüncü yöntemde öne sürülen ışıklandırma yaklaşımı, görünürlük testlerini dikkate almamaktadır. Bu yöntemin tez kapsamında öne sürülen görünürlük testi yöntemi ile birlikte kullanılması da mümkün değildir. Sahnedeki her nokta için görünürlük testi fonksiyonu, küresel harmonikler ile modellenebilir. Bu işlem dinamik sahneler için mümkün olmasa da statik sahneler için gerçekleştirilerek öne sürülen BRDF modeli ile birlikte kullanılabilirliği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Agarwal, S., Ramamoorthi, R., Belongie, S. and Jensen, H.W.**, 2003. Structured importance sampling of environment maps. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):605–612.
- Akenine-Möller, T., Haines, E. and Hoffman, N.**, 2008. Real-Time Rendering 3rd Edition. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA.
- Arfken, G.B. and Weber, H.J.**, 2005. Mathematical Methods for Physicists. Mathematical Methods for Physicists. Elsevier, London.
- Ashikhmin, M. and Shirley, P.**, 2000. An Anisotropic Phong BRDF Model. *J. Graph. Tools*, 5(2):25–32.
- Banks, D.C.**, 1994. Illumination in Diverse Codimensions. In Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM, New York, NY, USA, SIGGRAPH '94, p. 327–334.
- Beckmann, P. and Spizzichino, A.**, 1963. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. International series of monographs on electromagnetic waves. Pergamon Press; [distributed in the Western Hemisphere by Macmillan, New York].
- Bilgili, A., Öztürk, A. and Kurt, M.**, 2011. A General BRDF Representation Based on Tensor Decomposition. *Computer Graphics Forum*, 30(8):2427–2439.
- Bilmes, J.**, 1998. A Gentle Tutorial of the EM Algorithm and its Application to Parameter Estimation for Gaussian Mixture and Hidden Markov Models. Technical Report, ICSI.
- Blinn, J.F.**, 1977. Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 11(2):192–198.
- Blinn, J.F. and Newell, M.E.**, 1976. Texture and reflection in computer generated images. *Commun. ACM*, 19(10):542–547.
- Burke, D., Ghosh, A. and Heidrich, W.**, 2005. Bidirectional Importance Sampling for Direct Illumination. In Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering Techniques, O. Deussen, A. Keller, K. Bala, P.D. é, D.W. Feller and S.N. Spencer, eds.. Eurographics Association, Konstanz, Germany, p. 147–156.
- Chazelle, B., Dobkin, D.P., Shouraboura, N. and Tal, A.**, 1995. Strategies for Polyhedral Surface Decomposition: An Experimental Study. In Proceedings of the Eleventh Annual Symposium on Computational Geometry. ACM, New York, NY, USA, SCG '95, p. 297–305.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Clarberg, P. and Akenine-Möller, T.**, 2008. Practical Product Importance Sampling for Direct Illumination. *Computer Graphics Forum*, 27(2).
- Clarberg, P., Jarosz, W., Akenine-Möller, T. and Jensen, H.W.**, 2005a. Wavelet importance sampling: efficiently evaluating products of complex functions. *ACM Trans. Graph.*, 24(3):1166–1175.
- Clarberg, P., Jarosz, W., Akenine-Möller, T. and Jensen, H.W.**, 2005b. Wavelet Importance Sampling: Efficiently Evaluating Products of Complex Functions. *ACM Trans. Graph.*, 24(3):1166–1175. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1073204.1073328>.
- Cline, D., Egbert, P.K., Talbot, J. and Cardon, D.L.**, 2006. Two Stage Importance Sampling for Direct Lighting. In *Rendering Techniques*, T. Akenine-Möller and W. Heidrich, eds.. Eurographics Association, p. 103–113.
- Colbert, M. and Křivánek, J.**, 2007. Real-time shading with filtered importance sampling. In *ACM SIGGRAPH 2007 sketches*. ACM, New York, NY, USA, SIGGRAPH '07.
- Cook, R.L. and Torrance, K.E.**, 1981. A Reflectance Model for Computer Graphics. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 15(3):307–316.
- Cook, R.L. and Torrance, K.E.**, 1982. A Reflectance Model for Computer Graphics. *ACM Trans. Graph.*, 1(1):7–24.
- Dachsbacher, C. and Kautz, J.**, 2009. Real-time Global Illumination for Dynamic Scenes. In *ACM SIGGRAPH 2009 Courses*. ACM, New York, NY, USA, SIGGRAPH '09, p. 19:1–19:217.
- Dachsbacher, C. and Stamminger, M.**, 2005. Reflective Shadow Maps. In *Proceedings of the 2005 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. ACM, New York, NY, USA, I3D '05, p. 203–231.
- Dachsbacher, C., Stamminger, M., Drettakis, G. and Durand, F.**, 2007. Implicit Visibility and Antiradiance for Interactive Global Illumination. *ACM Trans. Graph.*, 26(3).
- Debevec, P.**, 2005. A median cut algorithm for light probe sampling. In *ACM SIGGRAPH 2005 Posters*. ACM, New York, NY, USA, SIGGRAPH '05.
- Dempster, A.P., Laird, N.M. and Rubin, D.B.**, 1977. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *JOURNAL OF THE ROYAL STATISTICAL SOCIETY, SERIES B*, 39(1):1–38.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dong, Z., Grosch, T., Ritschel, T., Kautz, J. and Seidel, H.P.**, 2009. Real-time Indirect Illumination with Clustered Visibility. In Vision, Modeling, and Visualization Workshop.
- Dong, Z., Kautz, J., Theobalt, C. and Seidel, H.P.**, 2007. Interactive Global Illumination Using Implicit Visibility. In Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, M. Alexa, S.J. Gortler and T. Ju, eds.. IEEE Computer Society, p. 77–86.
- Edwards, D., Boulos, S., Johnson, J., Shirley, P., Ashikhmin, M., Stark, M. and Wyman, C.**, 2006. The Halfway Vector Disk for BRDF Modeling. *ACM Trans. Graph.*, 25(1):1–18.
- Garanzha, K., Pantaleoni, J. and McAllister, D.**, 2011. Simpler and Faster HLBVH with Work Queues. In Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on High Performance Graphics. ACM, New York, NY, USA, HPG '11, p. 59–64.
- García-Portugués, E.**, 2013. Exact risk improvement of bandwidth selectors for kernel density estimation with directional data. *Electronic Journal of Statistics*, 7:1655–1685.
- Ghosh, M., Amato, N.M., Lu, Y. and Lien, J.M.**, 2013. Fast Approximate Convex Decomposition Using Relative Concavity. *Comput. Aided Des.*, 45(2):494–504.
- Green, P., Kautz, J. and Durand, F.**, 2007. Efficient Reflectance and Visibility Approximations for Environment Map Rendering. *Computer Graphics Forum (Proc. EUROGRAPHICS)*, 26(3):495–502.
- Green, P., Kautz, J., Matusik, W. and Durand, F.**, 2006. View-dependent Pre-computed Light Transport Using Nonlinear Gaussian Function Approximations. In Proceedings of the 2006 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. ACM, New York, NY, USA, I3D '06, p. 7–14.
- Han, C., Sun, B., Ramamoorthi, R. and Grinspun, E.**, 2007. Frequency Domain Normal Map Filtering. *ACM Trans. Graph.*, 26(3):28:1–28:12.
- Heckbert, P.**, 1993. Introduction to Finite Element Methods & Finite Element Methods for Radiosity, Global Illumination course notes. In SIGGRAPH. p. 41–410 51–57.
- Heidrich, W. and Seidel, H.P.**, 1998. View-independent Environment Maps. In Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Workshop on Graphics Hardware. ACM, New York, NY, USA, HWWS '98, p. 39–45.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Iwasaki, K., Dobashi, Y. and Nishita, T.**, 2012. Interactive Bi-scale Editing of Highly Glossy Materials. *ACM Trans. Graph.*, 31(6):144:1–144:7.
- Jensen, H.W.**, 1996. Global Illumination Using Photon Maps. In Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '96. Springer-Verlag, London, UK, UK, p. 21–30. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=275458.275461>.
- Kajiya, J.T.**, 1986. The rendering equation. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4):143–150.
- Kaplanyan, A. and Dachsbacher, C.**, 2010. Cascaded Light Propagation Volumes for Real-time Indirect Illumination. In Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. ACM, New York, NY, USA, I3D '10, p. 99–107.
- Kautz, J., Vázquez, P.P., Heidrich, W. and Seidel, H.P.**, 2000. Unified Approach to Prefiltered Environment Maps. In Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques 2000. Springer-Verlag, London, UK, UK, p. 185–196.
- Keller, A.**, 1997. Instant Radiosity. In Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, SIGGRAPH '97, p. 49–56.
- Kollig, T. and Keller, A.**, 2003. Efficient illumination by high dynamic range images. In Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, EGRW '03, p. 45–50.
- Lafortune, E.P.F., Foo, S.C., Torrance, K.E. and Greenberg, D.P.**, 1997. Non-linear Approximation of Reflectance Functions. In Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA, SIGGRAPH '97, p. 117–126.
- Laine, S., Saransaari, H., Kontkanen, J., Lehtinen, J. and Aila, T.**, 2007. Incremental Instant Radiosity for Real-time Indirect Illumination. In Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, EGSR'07, p. 277–286.
- Lawrence, J., Rusinkiewicz, S. and Ramamoorthi, R.**, 2004. Efficient BRDF importance sampling using a factored representation. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):496–505.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lewis, R.R.**, 1994. Making Shaders More Physically Plausible. *Computer Graphics Forum*, 13(2):109–120.
- Lien, J.M. and Amato, N.M.**, 2007. Approximate Convex Decomposition of Polyhedra. In Proceedings of the 2007 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. ACM, New York, NY, USA, SPM '07, p. 121–131.
- Lien, J.M. and Amato, N.M.**, 2008. Approximate convex decomposition of polyhedra and its applications. *Computer Aided Geometric Design*, 25(7):503–522.
- Mamou, K. and Ghorbel, F.**, 2009. A simple and efficient approach for 3D mesh approximate convex decomposition. In Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing. IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, ICIP'09, p. 3465–3468.
- Mittring, M.**, 2007. Finding Next Gen: CryEngine 2. In ACM SIGGRAPH 2007 Courses. ACM, New York, NY, USA, SIGGRAPH '07, p. 97–121.
- Ng, R., Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.**, 2003. All-frequency shadows using non-linear wavelet lighting approximation. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3):376–381.
- Ng, R., Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.**, 2004. Triple product wavelet integrals for all-frequency relighting. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):477–487.
- Ngan, A., Durand, F. and Matusik, W.**, 2005. Experimental Analysis of BRDF Models. In Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering. Eurographics Association, Konstanz, Germany, p. 117–226.
- Nicodemus, F.E.**, 1965. Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface. *Appl. Opt.*, 4(7):767–775.
- Novák, J. and Dachsbacher, C.**, 2012. Rasterized Bounding Volume Hierarchies. *Computer Graphics Forum*, 31(2):403–412.
- NVIDIA**, 2012. CUDA introduction page. URL <http://developer.nvidia.com/category/zone/cuda-zone>.
- NVIDIA**, 2013. OptiX Application Acceleration Engine. URL <http://www.nvidia.com/object/optix.html>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Oren, M. and Nayar, S.K.**, 1994. Generalization of Lambert's Reflectance Model. In Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM, New York, NY, USA, SIGGRAPH '94, p. 239–246.
- Ostromoukhov, V., Donohue, C. and Jodoin, P.M.**, 2004. Fast hierarchical importance sampling with blue noise properties. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):488–495.
- Pantaleoni, J.**, 2013. slash-sandbox. URL <https://code.google.com/p/slash-sandbox/>.
- Pellegrini, M.**, 1999. Rendering Equation Revisited: How to Avoid Explicit Visibility Computations. In Proceedings of the Tenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA, p. 725–733.
- Pharr, M. and Humphreys, G.**, 2010. Physically Based Rendering, Second Edition: From Theory To Implementation. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2nd edition.
- Phong, B.T.**, 1975. Illumination for Computer Generated Pictures. *Commun. ACM*, 18(6):311–317.
- Ritschel, T., Grosch, T., Kim, M.H., Seidel, H.P., Dachsbacher, C. and Kautz, J.**, 2008. Imperfect Shadow Maps for Efficient Computation of Indirect Illumination. *ACM Trans. Graph.*, 27(5):129:1–129:8.
- Robert, C.P. and Casella, G.**, 2005. Monte Carlo Statistical Methods. Springer Texts in Statistics. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA.
- Rusinkiewicz, S.**, 1998. A New Change of Variables for Efficient BRDF Representation. In Rendering Techniques. Proc. Eurographics Workshop on Rendering.
- Shilane P., Min P., K.M.F.T.**, 2004. The Princeton Shape Benchmark. In Proceedings of the Shape Modeling International 2004. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, SMI '04, p. 167–178.
- Silverman, B.W.**, 1986. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. Chapman & Hall, London.
- Sloan, P.P., Kautz, J. and Snyder, J.**, 2002. Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments. *ACM Trans. Graph.*, 21(3):527–536.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Suffern, K.**, 2007. Ray Tracing from the Ground Up. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA.
- Talbot, J., Cline, D. and Egbert, P.K.**, 2005. Importance Resampling for Global Illumination. In *Rendering Techniques*. p. 139–146.
- Tan, P., Lin, S., Quan, L., Guo, B. and Shum, H.Y.**, 2005. Multiresolution Reflectance Filtering. In *Proceedings of the Sixteenth Eurographics Conference on Rendering Techniques*. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, EGSR'05, p. 111–116.
- Töral, O.A., Ergun, S. and Öztürk, A.**, 2014. Real-Time Distant Light Filtering using Gaussian Mixture Model. In *Proceedings of EURASIA GRAPHICS 2014*. Hacettepe University Press, Ankara, Turkey, p. 1:1–1:6.
- Torrance, K.E. and Sparrow, E.M.**, 1966. Off-specular peaks in the directional distribution of reflected thermal radiation. *Journal of Heat Transfer*, 88(2):223–230.
- Tsai, Y.T. and Shih, Z.C.**, 2006. All-frequency Precomputed Radiance Transfer Using Spherical Radial Basis Functions and Clustered Tensor Approximation. *ACM Trans. Graph.*, 25(3):967–976.
- Veach, E.**, 1998. Robust monte carlo methods for light transport simulation. Ph.D. thesis, Stanford University, Stanford, CA, USA.
- Wang, J., Ren, P., Gong, M., Snyder, J. and Guo, B.**, 2009. All-frequency Rendering of Dynamic, Spatially-varying Reflectance. *ACM Trans. Graph.*, 28(5):133:1–133:10.
- Ward, G.J.**, 1992. Measuring and modeling anisotropic reflection. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 26(2):265–272.
- Xu, K., Jia, Y.T., Fu, H., Hu, S.M. and Tai, C.L.**, 2008. Spherical Piecewise Constant Basis Functions for All-Frequency Precomputed Radiance Transfer. *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, 14(2):454–467.
- Xu, K., Sun, W.L., Dong, Z., Zhao, D.Y., Wu, R.D. and Hu, S.M.**, 2013. Anisotropic Spherical Gaussians. *ACM Trans. Graph.*, 32(6):209:1–209:11.
- Zhou, K., Hou, Q., Wang, R. and Guo, B.**, 2008. Real-time KD-tree Construction on Graphics Hardware. *ACM Trans. Graph.*, 27(5):126:1–126:11.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhu, C., Byrd, R.H., Lu, P. and Nocedal, J., 1997. Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran Subroutines for Large-scale Bound-constrained Optimization. *ACM Trans. Math. Softw.*, 23(4):550–560.

ÖZGEÇMİŞ

Serkan ERGUN

Adres: Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü 35100 Bornova/İZMİR
Telefon: (+90) 5557372232
email:serkan.ergun@gmail.com

Kişisel Bilgiler

Milliyeti: Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi: İzmir, 28.04.1984

Eğitim Durumu

Doktora : 2008 - , Ege Üniversitesi, Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü
Yüksek Lisans: 2006-2008, Ege Üniversitesi, Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü
Lisans: 2002-2006, İzmir Ekonomi Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği
Lise: 1995-2002, İzmir Milli Piyango Anadolu Lisesi

Yabancı Dil

Türkçe : Anadil
İngilizce : İyi derecede
Almanca: Başlangıç

Bilgisayar Dilleri

C/C++, C#, Java, Matlab, L^AT_EX

Projeler

2009: Yeni teknolojiler ile bir insanın yüz modelini çıkartma ve modele ait vücut hareketlerini yakalama. (BAP: 09-UBE-001)
2010: Kalıp Tasarımında Süreç İnovasyonu Ve 3 Boyutlu Tasarım Programı Geliştirilmesi. (TUBİTAK:7090852)
2011: Android Tabanlı Sistemlerin Arttırılmış Gerçeklik Ve Eğitimde Kullanılması. (BAP: 11-UBE-002)

Yayınlar

- Bintas, M., Kara, Y., Oz, C., Surek, S., Aydın, M., Ergun, S.**, 2015, Profile Based Naming and Resolving Name Ambiguities in ÇİZEN. Accepted.
- Bintas, M., Ozturk, A., Gungor, C., Tutay, A., Bilgili, A., Kurt, M., Ergun, S., Kayitken, T. and Gercek, E.**, 2011, Development of a Computer Aided Die Design Software and Die Design Process Modeling. in Proceedings of 6th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds. Atılım University Publications, Ankara, Turkey, 285–290 pp.
- Dalkılıç, M.E. and Ergun, S.**, 2013, A Simple Yet Fast Algorithm for the Closest-Pair Problem Using Sorted Projections on Multi-dimensions. in 28th International Symposium on Computer and Information Sciences. 23–34 pp.
- Ergun, S., Kurt, M. and Öztürk, A.**, 2012, Real-time kd-tree based importance sampling of environment maps. in Proceedings of the 28th Spring Conference on Computer Graphics. ACM, New York, NY, USA, SCCG '12, 77–84 pp.
- Güngör, C. and Ergun, S.**, 2009, A Survey on Real-time Shadow Systems in Computer Graphics and Comparison of Techniques. *Firat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(1):43–52 pp.
- Seylan, N., Ergun, S. and Öztürk, A.**, 2013, BRDF Reconstruction Using Compressive Sensing. in WSCG International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision. 88–94 pp.
- Töral, Ö. A., Ergun, S., Kurt, M. and Öztürk, A.**, 2014, Mobile gpu-based importance sampling. in Proceedings of the IEEE 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference. Trabzon, Turkey, SIU '14, 510–513 pp.
- Töral, Ö. A., Ergun, S. and Öztürk, A.**, 2014, Real-Time Distant Light Filtering using Gaussian Mixture Model. in Proceedings of EURASIA GRAPHICS 2014. Ankara, Turkey, 1:1–1:6 pp.
- Yilmaz, O., Demirci, S., Kaymak, Y., Ergun, S. and Yildirim, A.**, 2012, Shortest hop multipath algorithm for wireless sensor networks. *Computers & Mathematics with Applications*, 63(1):48 – 59 pp.

EKLER

Ek 1 Türkçe-İngilizce Terimler Sözlüğü

Ek 1 Türkçe-İngilizce Terimler Sözlüğü

Anında Işınsallık	Instant Radiosity
Artımsal Anında Işınsallık	Incremental Instant Radiosity
Azimet	Azimuth
Aşındırma	Erosion
Beklenen Değer Maksimizasyonu	Expectation-Maximization
Doygunluk	Saturation
Ekran Uzayı Çevresel Perdeleme	Screen Space Ambient Occlusion
Elevasyon	Elevation
Fiziksel Olarak Tatmin Edici	Physically Plausible
Gauss Karışım Modeli	Gaussian Mixture Model
Genişletme	Dilation
Geri Yansıtıcı	Retroreflective
Grafik İşlem Birimi	Graphics Processing Unit
Görsel Olarak Tatmin Edici	Visually Plausible
Hesaplama Bütünleşik Cihaz Mi-marisi	Compute Unified Device Architec-ture
Hiyerarşik Yaklaşık Dışbükey Ayrıştırma	Hierarchical Approximate Convex Decomposition
Hızlı Yaklaşık Dışbükey Ayrıştırma	Fast Approximate Convex Decom-position
Kapsayan Hacim Hiyerarşisi	Bounding Volume Hierarchy
Karşılıklı Yansımalar	Inter-reflections

Karşılıklık	Reciprocity
Katı Açı	Solid Angle
Kusurlu Gölge Dokuları	Imperfect Shadow Maps
Kümülatif Dağılım Fonksiyonu	Cumulative Distribution Function
Küresel Harmonikler	Spherical Harmonics
Küresel Normal Dağılım	Spherical Gaussian
Kırılmalar	Caustics
Merkezi İşlem Birimi	Central Processing Unit
Pikselleştirme	rasterization
Rasterize Edilmiş Kapsayan Hacim Hiyerarşisi	Rasterized Bounding Volume Hierarchy
Renk Tonu	Hue
Sanal Alansal Işık Kaynakları	Virtual Area Lights
Sanal Noktasal Işık Kaynakları	Virtual Point Lights
Sonlu Elemanlar Yöntemleri	Finite Elements Methods
Tepe Sinyal Gürülütü Oranı	Peak Signal-to-Noise Ratio
Yaklaşık Dışbükey Ayrıştırma	Approximate Convex Decomposition
Yansıtıcı Gölge Dokuları	Reflective Shadow Maps
Yüksek Dinamik Aralık	High Dynamic Range
Yükseklik Haritası	Height Map
Yüzey Altı Saçılma	Sub-Surface Scattering

Zayıflama	Attenuation
Çekirdek Yoğunluk Kestirimi	Kernel Density Estimation
Çoklu Önemine Göre Örnekleme	Multiple Importance Sampling
Önceden Hesaplanmış Parlaklık Transferi	Precomputed Radiance Transfer
Çift Yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu	Bidirectional Reflectance Distribution Function
Çift Yönlü Yüzey-Altı Saçılım Fonksiyonu	Bidirectional Sub-Surface Scattering Function
Izgara Kıyım	Grid Hash
Işın Yürütme	Ray Marching
Işınsalık	Radiosity